

Risco em Gasodutos Urbanos

Cátia Sofia Vieira Reis

Mestrado em Engenharia Matemática

Departamento de Matemática

2017

Orientadoras

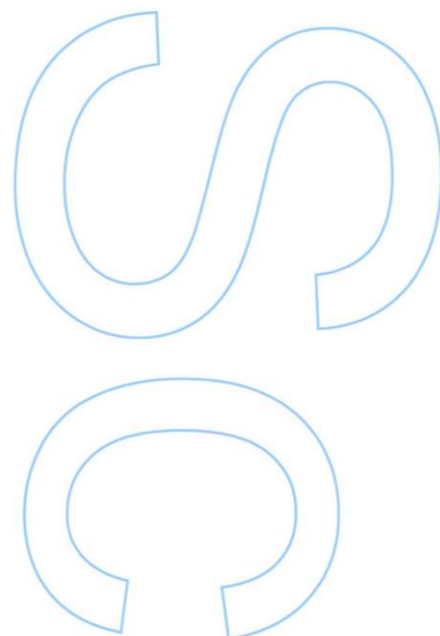
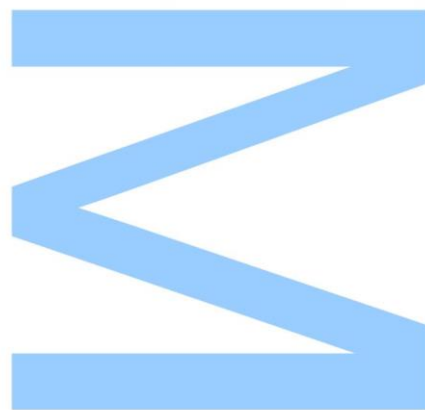
Prof. Dr^a. Maria João Rodrigues, FCUP

Prof. Dr^a. Margarida Brito, FCUP

Supervisores de estágio

Eng. Rui Bessa, Direção Técnica, EDP Gás Distribuição

Eng. Ricardo Moreira, Direção Técnica, EDP Gás Distribuição

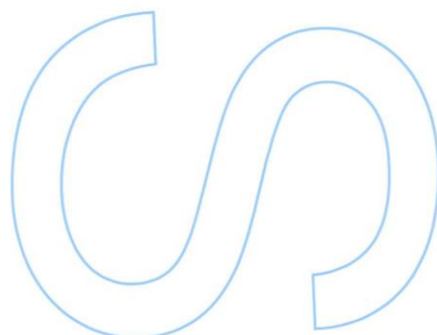
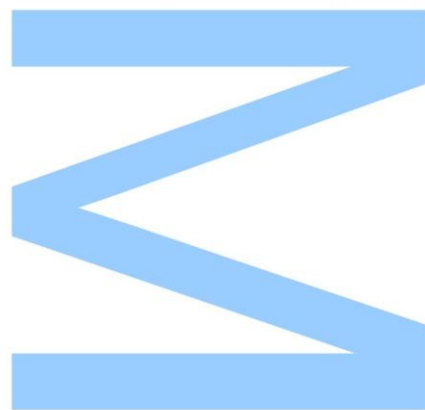




Todas as correções determinadas pelo júri, e só essas, foram efetuadas.

O Presidente do Júri,

Porto, ____/____/____



Agradecimentos

Começo por agradecer à pessoa que possibilitou todo este percurso, à pessoa que me acompanha há 23 anos, que sofre e ri comigo, à minha mãe. Quero também deixar um agradecimento ao meu pai, por todos os ensinamentos, todo o amor e carinho e, principalmente, por ser o meu exemplo a seguir desde criança.

Um muito obrigada a todos os que contribuíram neste percurso. Em especial:

Às professoras Maria João Rodrigues e Margarida Brito por todo o apoio, sugestões, pela inigualável boa disposição e sobretudo pela paciência que tiveram ao longo deste ano.

Ao Eng. Ricardo Moreira, da EDP Gás Distribuição, por me ter acolhido de braços abertos na empresa e por toda orientação dada.

Quero agradecer às Judites por todos os momentos partilhados. Sem dúvida que os amigos são o que levamos de melhor da faculdade. Gostava de agradecer em particular à Carla, ao Paulo, à Sara, à Ariana e à Mariana por nunca terem duvidado de mim, pela força e por todo o apoio desde o primeiro até ao último dia. Agradeço ao Marco e à Ana Dulce por todo o incentivo, pelo carinho e por permitirem que eu seja uma “DDA”. Não existem palavras suficientes para expressar o quão grata me sinto.

Ao Gil, pela paciência infinita nos momentos de mau humor, pelo carinho (e docinhos) nos momentos de tristeza, por tornar tudo mais fácil e estar sempre do meu lado. O meu mais doce obrigada.

A todos os que fizeram parte destes cinco anos o meu muito obrigada. Obrigada por cinco anos recheados de amizade, amor e aprendizagem.

Resumo

O gás natural é uma fonte de energia segura que pode ser utilizada em habitações, na indústria ou até mesmo como combustível de automóveis. Apesar das inúmeras vantagens associadas à sua utilização, quando este gás entra em contacto com a população podem resultar consequências nefastas. Salienta-se que a principal causa associada aos incidentes nas tubagens de gás natural é a intervenção externa, da qual pode derivar uma rotura na tubagem e uma consequente libertação de gás. A necessidade de mitigar as consequências associadas aos incidentes na rede gás é evidente.

A presente dissertação surge no âmbito de um estágio curricular, realizado numa empresa de serviço público de distribuição de gás natural, a EDP Gás Distribuição, pelo período de seis meses. Com o propósito de caracterizar o risco de incidentes nas tubagens da rede gás, aplicou-se um modelo que combina variáveis qualitativas e quantitativas, resultando uma avaliação de risco mais próxima da realidade. Este modelo surge como uma combinação do processo hierárquico analítico com conceitos de matemática difusa. Em particular, determinou-se o fator de maior risco para os incidentes nas tubagens de gás natural, que corresponde, efetivamente, às intervenções indevidas por entidades terceiras ou executadas incorretamente por parte ou de internos da empresa ou de prestadores de serviço externos. Além disso, o risco de incidentes na rede gás em ambiente urbano foi considerado baixo.

Palavras-chave: Processo Hierárquico Analítico, Avaliação Difusa Abrangente, Risco, Gás Natural

Abstract

Natural gas is a safe power supply that can be used in residences, industry or even as a car fuel. Despite the innumerable advantages associated with its use, when the gas gets in touch with people, it may result in serious consequences. Actually, the main cause associated with the incidents of natural gas is the external intervention, which can cause a pipeline rupture and a sequent gas leak. Clearly there is a need to mitigate the consequences associated with gas network incidents.

The present dissertation arises from a curricular traineeship conducted at a public service company for the distribution of natural gas, EDP Gás Distribuição, during a period of six months. In order to characterize the risk of incidents in the gas network pipelines, a model which combines qualitative and quantitative variables was applied, resulting in a risk assessment that is closer to reality. The model used is a derivation of the analytical hierarchical process combined with fuzzy concepts. The application of this model, led to the conclusion that the higher risk factor for the incidents in the natural gas pipelines is the improper intervention by third parties or the interventions performed incorrectly by company employees or service providers. Besides that, the risk of network incidents gas in urban environment was considered low.

Key-words: Analytic Hierarchy Process, Fuzzy Comprehensive Evaluation, Risk, Natural Gas

Conteúdo

Resumo	6
Abstract	7
Glossário	14
Siglas	15
1 Introdução	16
1.1 Objetivos	16
1.2 Apresentação da Empresa	19
1.3 Enquadramento do Estágio	20
2 Metodologia	27
2.1 Revisão de literatura	27
2.2 Processo Hierárquico Analítico	29
2.3 Processo Hierárquico Analítico Difuso	44
3 Caso de Estudo	54
3.1 Problema	54
3.1.1 Seleção dos participantes	55
3.1.2 Estrutura hierárquica dos fatores de risco dos gasodutos urbanos . .	56
3.1.3 Cálculo do Vetor dos Pesos e Teste de Consistência	59
3.2 Discussão dos Resultados	69
3.3 Considerações Finais	70
Bibliografia	71
A Segundo Questionário	74

Lista de Figuras

1.1	Mapa da área de concessão da EDP Gás Distribuição (Fonte: Documentação da EDP Gás Distribuição)	20
2.1	Componentes de uma estrutura hierárquica de decisão	31
2.2	Exemplo de uma estrutura hierárquica de decisão [9]	32
2.3	Função de pertença associada à “juvenilidade”	46
2.4	Principais funções de pertença	47
3.1	Estrutura hierárquica do conjunto dos fatores de risco	58
3.2	Fluxo da aplicação do método AHP	64
A.1	Peritos participantes no estudo	75
A.2	Habilitações dos peritos na forma agregada	75
A.3	Anos de experiência dos peritos	75
A.4	Comparação dos fatores: intervenção indevida por entidades terceiras/intervenções executadas incorretamente (internos e PSE) e corrosão nas tubagens	76
A.5	Comparação dos fatores: intervenção indevida por entidades terceiras/intervenções executadas incorretamente (internos e PSE) e fatores de projeto	76
A.6	Comparação dos fatores: intervenção indevida por entidades terceiras/intervenções executadas incorretamente (internos e PSE) e localização de redes	77
A.7	Comparação dos fatores: intervenção indevida por entidades terceiras/intervenções executadas incorretamente (internos e PSE) e fatores geológicos	77
A.8	Comparação dos fatores: corrosão nas tubagens e fatores de projeto	77
A.9	Comparação dos fatores: corrosão nas tubagens e localização de redes	78
A.10	Comparação dos fatores: corrosão nas tubagens e fatores geológicos	78
A.11	Comparação dos fatores: fatores de projeto e localização de redes	78
A.12	Comparação dos fatores: fatores de projeto e fatores geológicos	79

A.13 Comparação dos fatores: localização de redes e fatores geológicos	79
A.14 Comparação dos subcritérios: operações executadas incorretamente por parte da exploração e manutenção e intervenções indevidas por entidades terceiras (fraudes, roubos, entre outras)	80
A.15 Comparação dos subcritérios: operações executadas incorretamente por parte da exploração e manutenção e aumento do número de intervenções por parte de entidades externas nas proximidades da EDP Gás Distribuição	80
A.16 Comparação dos subcritérios: operações executadas incorretamente por parte da exploração e manutenção e ausência de cadastro em obras por entidades terceiras	81
A.17 Comparação dos subcritérios: operações executadas incorretamente por parte da exploração e manutenção e estado dos equipamentos (PRM, CCG, entre outros)	81
A.18 Comparação dos subcritérios: intervenções indevidas por entidades terceiras (fraudes, roubos, entre outras) e aumento do número de intervenções por parte de entidades externas nas proximidades da EDP Gás Distribuição . .	81
A.19 Comparação dos subcritérios: intervenções indevidas por entidades tercei- ras (fraudes, roubos, entre outras) e ausência de cadastro em obras por entidades terceiras	82
A.20 Comparação dos subcritérios: intervenções indevidas por entidades terceiras (fraudes, roubos, entre outras) e estados equipamentos (PRM, CCG, entre outros)	82
A.21 Comparação dos subcritérios: aumento do número de intervenções por parte de entidades externas nas proximidades da EDP Gás Distribuição e ausência de cadastro em obras por entidades terceiras	82
A.22 Comparação dos subcritérios: aumento do número de intervenções por parte de entidades externas nas proximidades da EDP Gás Distribuição e estado dos equipamentos (PRM, CCG, entre outros)	83
A.23 Comparação dos subcritérios: ausência de cadastro em obras por entidades terceiras e estado dos equipamentos (PRM, CCG, entre outros)	83
A.24 Comparação dos subcritérios: corrosão no interior da tubagem e corrosão no exterior da tubagem	84

A.25 Comparação dos subcritérios: material utilizado nas tubagens (aço, cobre e polietileno) e quantidade de novas interligações (ramais isolados e derivações de redes) após colocação em serviço	85
A.26 Comparação dos subcritérios: material utilizado nas tubagens (aço, cobre e polietileno) e aquisição de redes existentes a terceiros (por exemplo, distribuidores de GPL)	85
A.27 Comparação dos subcritérios: material utilizado nas tubagens (aço, cobre e polietileno) e quantidade de válvulas de rede	86
A.28 Comparação dos subcritérios: material utilizado nas tubagens (aço, cobre e polietileno) e existência de válvulas em todos os ramais	86
A.29 Comparação dos subcritérios: quantidade de novas interligações (ramais isolados e derivações de redes) após colocação em serviço e aquisição de redes existentes a terceiros (por exemplo, distribuidores de GPL)	86
A.30 Comparação dos subcritérios: quantidade de novas interligações (ramais isolados e derivações de redes) após colocação em serviço e quantidade de válvulas de rede	87
A.31 Comparação dos subcritérios: quantidade de novas interligações (ramais isolados e derivações de redes) após colocação em serviço e existência de válvulas em todos os ramais	87
A.32 Comparação dos subcritérios: aquisição de redes existentes a terceiros (por exemplo, distribuidores de GPL) e quantidade de válvulas de rede	87
A.33 Comparação dos subcritérios: aquisição de redes existentes a terceiros (por exemplo, distribuidores de GPL) e existência de válvulas em todos os ramais	88
A.34 Comparação dos subcritérios: quantidade de válvulas de rede e existência de válvulas em todos os ramais	88
A.35 Comparação dos subcritérios: faixas de rodagem e baías de estacionamento	89
A.36 Comparação dos subcritérios: faixas de rodagem e passeios	89
A.37 Comparação dos subcritérios: faixas de rodagem e locais propensos a possuir vegetação de grande porte	89
A.38 Comparação dos subcritérios: baías de estacionamento e passeios	90
A.39 Comparação dos subcritérios: baías de estacionamento e locais propensos a possuir vegetação de grande porte	90

A.40 Comparação dos subcritérios: passeios e locais propensos a possuir ve-	
getação de grande porte	90
A.41 Comparação dos subcritérios: movimentos de terra e cheias	91
A.42 Comparação dos subcritérios: movimentos de terra e fenómenos climáticos	
extremos	91
A.43 Comparação dos subcritérios: cheias e fenómenos climáticos extremos . . .	91

Lista de Tabelas

1.1	Composição do Gás Natural (Fonte: [5])	17
1.2	Concelhos estudados e respetivas dimensões	21
1.3	Identificação e descrição das variáveis utilizadas no estudo das roturas . . .	23
1.4	Identificação e descrição das variáveis utilizadas no estudo das ocorrências .	25
2.1	Escala fundamental de Saaty	34
2.2	Índice de consistência aleatório	41
3.1	Matriz de comparação dos critérios relativamente ao objetivo de decisão . .	60
3.2	Matriz de comparação para os subcritérios relativos às intervenções indevi- das por entidades terceiras ou executadas incorretamente (inclui internos e PSE)	61
3.3	Matriz de comparação para os subcritérios relativos à corrosão	61
3.4	Matriz de comparação para os subcritérios relativos aos fatores de projeto .	62
3.5	Matriz de comparação para os subcritérios relativos à localização de redes .	62
3.6	Matriz de comparação para os subcritérios relativos aos fatores geológicos .	63
3.7	Matriz de avaliação difusa dos subcritérios relativos às intervenções indevi- das por entidades terceiras ou executadas incorretamente (inclui internos e PSE)	65
3.8	Matriz de avaliação difusa dos subcritérios relativos à corrosão nas tubagens	65
3.9	Matriz de avaliação difusa dos subcritérios relativos aos fatores de projeto .	66
3.10	Matriz de avaliação difusa dos subcritérios relativos à localização de redes .	66
3.11	Matriz de avaliação difusa dos subcritérios relativos aos fatores geológicos .	66

Glossário

Ativo - Conjunto de bens e direitos necessários para a manutenção sustentada das atividades e do negócio, podendo identificar-se quer pela sua materialidade, quer pelo tempo em que permanece na posse da organização.

Perigo - Fonte ou situação com um potencial de danos no corpo humano (lesões ou ferimentos) ou para a saúde, património, ambiente do local de trabalho, ou uma combinação destas, entre outras.

Polietileno - Polímero de baixo custo e de composição química simples. Trata-se de um produto resistente ao impacto, com alta flexibilidade, estabilidade térmica e química.

Ramal - Conduto de ligação desde a rede secundária de gás natural até à instalação do cliente.

Redes de Distribuição Primária - Responsáveis pela veiculação de gás natural desde as Estações de Medida e Regulação de Gás (GRMS) até aos Postos de Regulação e Medida (PRM) nas zonas de consumo. A pressão de serviço situa-se entre 4 e 20bar.

Redes de Distribuição Secundária - Responsáveis pela distribuição de gás natural nos pontos de consumo a partir dos PRM. A pressão de serviço situa-se entre 0.5 e 4bar.

Risco - No contexto empresarial, risco é algo que ameace o percurso da organização no alcance dos seus objetivos.

As definições apresentadas têm como base documentação fornecida pela EDP Gás Distribuição.

Siglas

AHP - Analytic Hierarchy Process

CCG - Caixa de Corte Geral

CI - Consistency Index

CR - Consistency Ratio

FAHP - Fuzzy Analytic Hierarchy Process

GPL - Gás de Petróleo Liquefeito

MCDM - Multiple-Criteria Decision Making

PRM - Posto de Redução e Medição

PSE - Prestadores de Serviços Externos

REN - Redes Energéticas Nacionais

RI - Random Index

SCADA - Sistema de Supervisão, Controlo e Aquisição de Dados

VBA - Visual Basic for Applications

WAMM - Weighted Arithmetic Mean Method

WGMM - Weighted Geometric Mean Method

Capítulo 1

Introdução

1.1 Objetivos

O gás natural é uma subcategoria do petróleo e uma das principais fontes de energia fóssil. Na sua constituição destacam-se o metano, como seu composto maioritário, assim como outros compostos indesejáveis, nomeadamente o dióxido de carbono, o sulfato de hidrogénio e o azoto, que não sendo combustíveis, causam corrosão e outros problemas que afetam a produção e o processamento do gás natural.

Na natureza, este gás não apresenta cheiro nem cor, mas é odorizado artificialmente antes de ser distribuído, de modo a que seja possível detetar a sua presença [5].

Composto	Fração Molar
Metano	0.8407
Etano	0.0586
Propano	0.0220
i-Butano	0.0035
n-Butano	0.0058
i-Pentano	0.0027
n-Pentano	0.0025
Hexano	0.0028
Heptanes e mais pesados	0.0076
Dióxido de Carbono	0.0130
Sulfato de Hidrogénio	0.0063
Azoto	0.0345
Total	1.0000

Tabela 1.1: Composição do Gás Natural (Fonte: [5])

As grandes reservas de gás natural encontram-se na África, América do Norte, Sul e Central e na Europa. É pertinente mencionar que desde o fim da segunda guerra mundial o consumo de gás aumentou de forma rápida e significativa nas áreas comerciais, industriais e domésticas. O alvo, a longo prazo, é a substituição do petróleo por gás natural e, eventualmente, do gás natural por azoto [5].

O gás natural, comparativamente com outras energias, é um combustível com relevância económica e ambiental. Trata-se de uma fonte de energia segura, limpa, com emissão reduzida de poluentes e com diversas utilizações, nomeadamente na indústria, comércio, veículos e domicílios, com preços razoáveis. Apesar de se tratar de uma fonte segura, quando entra em contacto direto com a população pode ter consequências muito graves: quando inalado pode provocar a irritação das vias aéreas superiores, dores de cabeça, náuseas, tonturas e quando presente em altas concentrações pode causar asfixia e ser fatal. Além disso, trata-se de um gás inflamável e, assim sendo, existe a necessidade de eliminar todas as possíveis fontes de ignição.

Apesar das vantagens inerentes à utilização do gás natural, as severas consequências que este pode apresentar para a população são perceptíveis. De seguida mencionamos alguns casos que evidenciam a perigosidade deste gás.

- No ano 2006, na Indonésia, a explosão de um gasoduto que transportava gás natural causou a morte de sete pessoas e provocou quinze feridos. A explosão foi consequência da atividade vulcânica que havia começado meses antes de se dar a explosão [26].
- Em 2009, no Canadá, ocorreu uma rotura numa tubagem, construída em 1968 e pertencente à empresa *TransCanada Corporation Gas Transmission*, devido a corrosão profunda. No seguimento da rotura, ocorreu a libertação de 1.45 milhões m^3 de gás natural, mas sem registo de feridos [28].
- Em 2014, na empresa referida anteriormente, ocorreu a explosão de uma tubagem que transportava gás natural, decorrendo chamas com 300 metros de altura que demoraram cerca de doze horas a ser controladas. Apesar da dimensão da explosão, não se registaram feridos [29].
- Em 2005, na Bélgica, ocorreu uma explosão numa tubagem de alta pressão, que transportava gás natural, provocando mais de 120 feridos e a morte de 24 pessoas, as quais eram essencialmente polícias e bombeiros. Existem suspeitas que a causa da explosão foi a intervenção de terceiros na tubagem, decorrente de outras construções na área [25].

Existe uma grande variedade de causas que podem conduzir a incidentes nas tubagens, tais como:

- Intervenção externa;
- Falhas em tubagens, válvulas, flanges e outras componentes;
- Erros de operação e/ou manutenção;
- Corrosão interior e/ou exterior das tubagens;
- Defeitos de construção ou falhas mecânicas.

Existe inclusive uma minoria de incidentes cuja causa é desconhecida. A principal causa de incidentes nos gasodutos de gás natural é, indubitavelmente, a intervenção externa que na maioria das vezes é composta por atividades de terceiros, como por exemplo:

- Escavações nas proximidades das tubagens (este é um dos cenários que apresenta maior probabilidade e cujas consequências são graves);

- Construções indevidas;
- Acidentes ferroviários;
- Fenómenos naturais;
- Vandalismo.

Quando são consideradas condições atmosféricas constantes, as consequências de uma rotura numa tubagem dependem essencialmente da pressão a que o gás se encontra e do diâmetro da rotura, na medida em que, quanto maior a pressão, maior a massa de gás libertada por unidade de tempo e quanto maior o diâmetro interno da tubagem, mais drásticas serão as consequências. Os acidentes classificados como sendo os de maior gravidade são aqueles que causam falhas nas tubagens e uma consequente libertação de gás. Como seria expectável, o pior cenário possível ocorre numa rede de distribuição primária, de diâmetro e densidade populacional elevados.

Evidentemente, um incidente numa tubagem de gás natural pode surtir diversos tipos de danos: operacionais, ambientais, danos em bens e danos que afetam a integridade física dos trabalhadores da EDP Gás Distribuição e da população em geral. Efetivamente, o estudo do risco associado à distribuição de gás natural é imprescindível, bem como a procura de medidas de prevenção que minimizem o número de incidentes nas infraestruturas e atenuem as consequências decorrentes dos mesmos.

O estágio curricular surge com o propósito de estudar o risco associado à ocorrência de incidentes na rede de gás, de uma forma mais qualitativa e próxima da realidade de quem lida com o mesmo diariamente. Além disso, também se pretende encontrar medidas que atenuem as consequências decorrentes de incidentes nas tubagens transportadoras de gás natural.

1.2 Apresentação da Empresa

A empresa Portgás - Sociedade de Produção e Distribuição de Gás está na génese da EDP Gás Distribuição, entrando em vigor com esta marca a 1 de Janeiro 2008, fortalecendo desta forma a sua ligação com o Grupo EDP. Trata-se de uma empresa de serviço público, de distribuição de gás natural.

A EDP Gás Distribuição centra a sua atividade no desenvolvimento e exploração da rede pública de distribuição do gás natural em 29 concelhos dos distritos do Porto, Braga e Viana do Castelo. É da responsabilidade do centro de exploração coordenar todas as

atividades que dizem respeito à gestão da manutenção, vigilância e à intervenção num conjunto de redes primárias, assim como em todas as redes secundárias que derivam destas. Existem dois centros de operação localizados no Porto (sede) e em Braga [27].

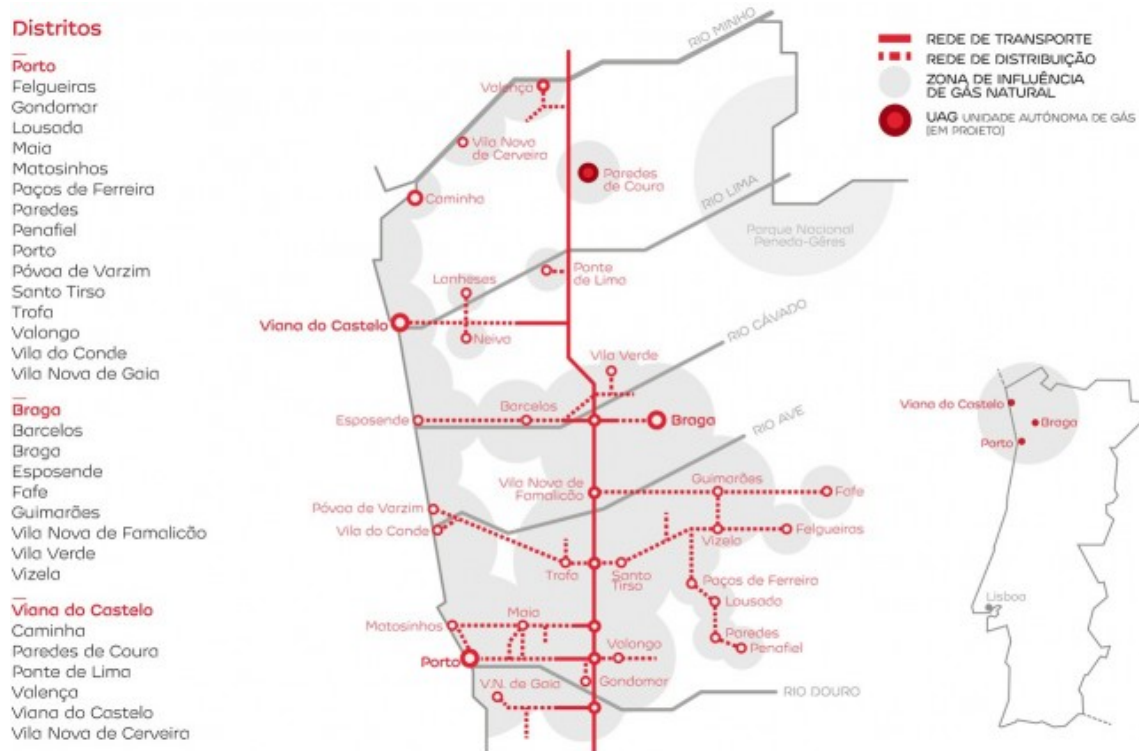


Figura 1.1: Mapa da área de concessão da EDP Gás Distribuição (Fonte: Documentação da EDP Gás Distribuição)

A grande missão da empresa visa providenciar e garantir a continuidade dos serviços de gás natural salvaguardando o bem estar das pessoas, bens, infraestruturas e ambiente.

1.3 Enquadramento do Estágio

É indubitável que os ativos da EDP Gás Distribuição estão expostos a ações externas de enorme perigo para as infraestruturas, pessoas, bens e ambiente, o que evidencia a necessidade de haver um controlo eficiente dos riscos, para uma adequada vigilância e mitigação dos mesmos, de forma a que se mantenham aceitáveis para a população e para o meio ambiente.

O objetivo do projeto, decorrente do estágio, é a exploração de um modelo para a determinação do risco de incidentes nos gasodutos em ambiente urbano. Pretende-se uma caracterização realista para os trabalhadores da empresa e para população em geral, tendo em consideração os impactos, essencialmente aos níveis ambiental e de segurança, assim

como a indicação de medidas para a redução do risco.

Durante o estágio curricular foi desenvolvido um manual, vinculado à empresa EDP Gás Distribuição, intitulado por “Risco em Gasodutos Urbano”, no qual foram incluídas algumas análises pertinentes para a compreensão do risco de incidentes em gasodutos urbanos, o qual foi explorado de variadas vertentes. Com o propósito de uma análise realista, aplicaremos uma metodologia baseada na experiência, opinião e também nos dados físicos de um problema, para que seja tomada uma decisão baseada em aspetos quantitativos e qualitativos. Esta abordagem denomina-se por Processo Hierárquico Analítico, *AHP - Analytic Hierarchical Process* (e.g. [23]).

Numa primeira parte, o manual “Risco em Gasodutos Urbanos” inclui uma caracterização do processo de análise de risco, a identificação e a explicação de conceitos-chave. Integra uma breve descrição e alguns exemplos de incidentes em gasodutos urbanos a nível mundial, de modo a ser perceptível a relevância do estudo do risco neste âmbito, terminando com a identificação das principais causas, perigos e danos relativos aos incidentes, assim como das entidades intervenientes para os controlar e/ou corrigir. É necessário frisar que a principal causa de incidentes nas tubagens transportadoras de gás natural é a intervenção externa, na maioria das vezes composta por atividades de terceiros. Os incidentes classificados como os de maior gravidade são aqueles que causam falhas nas tubagens e uma consequente libertação de gás. Relembra-se que o pior cenário possível trata-se de um incidente numa rede de distribuição primária, de grande diâmetro e de densidade populacional elevada.

De seguida, mencionam-se alguns detalhes das análises realizadas à rede de distribuição da EDP Gás Distribuição. Nas análises são considerados os concelhos Maia, Matosinhos, Paredes e Porto no distrito do Porto, entre 01-01-2014 e 31-12-2016.

Concelho	Perímetro (km)	Área (km^2)
Maia	67 095	83 996
Matosinhos	58 916	62 421
Paredes	79 225	156 761
Porto	36 470	41 421

Tabela 1.2: Concelhos estudados e respetivas dimensões

Os dados referidos na tabela 1.2 foram obtidos a partir de documentação disponibilizada

pela EDP Gás Distribuição.

O ponto de partida é a análise das metragens para o fim dos anos 2015 e 2016. Para cada concelho e fim de ano, consideraram-se os comprimentos das tubagens das condutas de distribuição primária, de distribuição secundária e das condutas de ramais. Além disso, analisou-se a quantidade de equipamentos ativos nas datas em questão. O objetivo foi entender a evolução dos comprimentos das tubagens e a utilização dos equipamentos no período de tempo considerado. Esta análise é imprescindível uma vez que outras análises são dependentes desta para efeitos de normalização dos dados.

As roturas são alvo de particular atenção durante o estudo devido à gravidade das suas consequências. Neste domínio analisaram-se os campos que se encontram descritos na tabela 1.3, para um total de 36 roturas registadas entre 01-01-2014 e 31-12-2016, as quais não apresentam danos graves associados.

Para realização de análises futuras sugeriu-se a consideração de outras variáveis adicionais que podem ter relevância na prevenção da ocorrência de roturas:

- Profundidade à qual as tubagens estão enterradas;
- Existência de outras redes (água, eletricidade, comunicações) perto das infraestruturas da EDP Gás Distribuição;
- Ano de construção das tubagens;
- Número de reparações nas tubagens desde a sua criação.

Efetivamente, as tubagens que estão instaladas a uma maior profundidade, assim como as que não se encontram perto de outras redes apresentam um risco menor. Tubagens antigas ou que tenham sido reparadas várias vezes são mais propícias à ocorrência de uma rotura.

Variável	Variáveis associadas	Descrição
Relatório	-	Referência do relatório
Concelho	-	Concelhos possíveis: Maia, Matosinhos, Paredes, Porto
Data	-	Data da ocorrência da rotura
Horas	Hora da ocorrência	-
	Hora do registo da ocorrência	
	Hora de chegada ao local	
	Hora à qual a rede foi colocada em segurança	
	Hora da reposição da infraestrutura	
	Hora do restabelecimento da normalidade	
Tempo	-	Tempo decorrido entre a ocorrência da rotura e o restabelecimento da normalidade
Tipo de fuga	20% diâmetro	A tubagem tem uma perfuração correspondente a 20% do diâmetro
	Fissura	A tubagem não apresenta uma fissura que compromete a estanquicidade e por onde existe libertação de gás
	Pico	A tubagem apresenta uma perfuração com pequeno diâmetro
	Total	A tubagem foi danificada na totalidade do diâmetro. Fuga franca
Consequências	Fuga de gás	Quantidade de gás libertado para a atmosfera em m^3
	Danos pessoais	Danos em transeuntes ou trabalhadores ao serviço da EDP Gás Distribuição
	Danos materiais terceiros	A rotura causa danos em materiais não pertencentes à EDP Gás Distribuição
	Danos materiais EDP Gás Distribuição	Danos nas infraestruturas da EDP Gás Distribuição (por exemplo: tubagens, caixas ou equipamentos)
Intervenientes	-	As principais possíveis entidades intervenientes quando ocorre uma rotura são os bombeiros, polícia e a proteção civil
Tipo de cliente	Industriais e Grandes Terciários	Clientes com consumo anual superior a 10 000 m^3
	Pequenos Terciários	Clientes profissionais com consumo inferior a 10 000 m^3
	Domésticos	Consumos residenciais
Custos	-	Custos relativos à prestação de serviços externos à empresa, serviços internos, perdas de gás e danos materiais

Tabela 1.3: Identificação e descrição das variáveis utilizadas no estudo das roturas

Na literatura, uma das causas apontadas para a ocorrência de roturas é a existência de corrosão nas tubagens. Contudo, na EDP Gás Distribuição a corrosão não é considerada uma causa de incidentes, dado que não existem registos relacionados com esta componente. Acontece que as tubagens são maioritariamente em polietileno e este material não é suscetível à corrosão. Apesar das tubagens não apresentarem efeitos de corrosão, algumas apresentam um ligeiro desgaste na espessura devido ao armazenamento de um pó conhecido como “black power”.

Os defeitos de construção também são apontados como uma das grandes causas da ocorrência de roturas. Todavia, não existem defeitos de construção nas tubagens da EDP Gás, uma vez que estas são testadas antes de serem colocadas em utilização. Portanto, não existem incidentes devido a este fator.

Outra vertente importante para a análise do risco é o estudo do registo das ocorrências. Nesta vertente destacam-se as causas e sintomas das ocorrências, que revelam a gravidade da ocorrência, assim como o tempo em média, o que permite identificar se os serviços prestados pela EDP Gás Distribuição estão, ou não, em conformidade com os tempos estabelecidos por lei. Os campos analisados encontram-se mencionados na tabela 1.4.

Variável	Variáveis associadas	Descrição
Código	-	Código que identifica a ocorrência
Data	-	Data na qual se deu a ocorrência
Número de clientes afetados	-	-
Tipo de ocorrência	-	A ocorrência pode afetar clientes, ramais ou redes
Horas	Hora da ocorrência	-
	Hora de abertura da ocorrência	
	Hora da criação da ocorrência	
	Hora da atribuição da ocorrência	
	Hora de chegada ao local	
	Hora de resolução	
	Hora do fecho	
Sintoma	-	AIP – Anomalia Infraestrutura Portgás; DFA – Deficiente Func. Aparelho Queima; ENI – Entidades Inspetoras; EXP – Incêndio ou Explosão; FAS – Falha de Gás; FUG – Fuga de Gás; GAS – Cheiro a Gás; REL – Pedido de Religação; Outros
Causa	-	FGS - Fuga de Gás (rede); GCC - Gás cortado; ROR - Rotura Ramal; ROT - Rotura Rede; Outros
Concelho	-	Maia, Matosinhos, Paredes, Porto
Tempos	Tempo de resposta da EDP Gás Distribuição	Tempo decorrido entre a abertura da ocorrência e a chegada ao local
	Tempo de resposta dos prestadores de serviços	Tempo decorrido entre a atribuição da ocorrência e a chegada ao local
	Tempo de reparação	Tempo decorrido entre a abertura da ocorrência e o fecho da mesma
	Tempo total	Tempo decorrido da ocorrência e o fecho da mesma

Tabela 1.4: Identificação e descrição das variáveis utilizadas no estudo das ocorrências

O registo de chamadas foi o último alvo da análise da rede de distribuição da EDP Gás Distribuição. Neste domínio são consideradas apenas as chamadas relacionadas com libertações de gás, ou seja, falhas, fugas de gás, cheiros a gás, incêndios/explosões e ano-

malias nas infraestruturas.

Num breve capítulo, exploram-se os pressupostos associados à execução duma análise probabilística dos ativos da EDP Gás Distribuição. Além disso, realiza-se a identificação e caracterização dos ativos da empresa, sugerindo uma metodologia para a realização da análise.

No último capítulo do manual, está presente a caracterização de um modelo de risco para os gasodutos urbanos, que será o foco desta dissertação, auxiliado pela execução de um programa construído em VBA. No próximo capítulo da presente dissertação iremos aprofundar o modelo utilizado.

A presente dissertação encontra-se dividida em três capítulos: 1º Introdução, 2º Metodologia e 3º Caso de Estudo e Resultados.

No capítulo 1, foram abordados os objetivos e motivação do estágio. Realizou-se uma apresentação da empresa e um enquadramento do estágio, incluindo uma breve descrição do manual produzido durante o mesmo.

O capítulo 2 surge com uma secção que contempla uma pequena revisão de literatura do modelo de estudo. Nas secções seguintes é detalhada a metodologia e os principais conceitos utilizados.

No capítulo 3 é descrito o caso de estudo e é aplicada a metodologia descrita no capítulo 2. Na secção final, retratam-se os resultados, assim como as principais conclusões e limitações decorrentes da aplicação da metodologia utilizada.

Capítulo 2

Metodologia

Neste capítulo serão descritas a evolução e metodologia dos modelos AHP - *Analytic Hierarchy Process* e serão introduzidos conceitos difusos.

2.1 Revisão de literatura

O processo hierárquico analítico, *Analytic Hierarchy Process*, foi desenvolvido em 1980 pelo matemático *Thomas Lorie Saaty* [19]. Devido às inúmeras aplicações do método no domínio da tomada de decisão com múltiplos critérios (em inglês, *multiple criteria decision making (MCDM)*), este método tem sido explorado e estudado de forma intensa [6].

Trata-se de um método utilizado no setor financeiro, na educação, engenharia, indústria, administração e gestão, entre outros, por tomadores de decisão e investigadores. A sua vasta aplicação é devida à sua simplicidade, fácil utilização e grande flexibilidade [6].

Thomas L. Saaty introduziu este método com o objetivo de ser prático e suportar a tomada de decisões complexas. Existem inúmeros artigos que abordam a metodologia AHP, podendo ser combinada com técnicas de programação matemática [6].

Gang Liu e Yong Wang (2012) aplicaram uma avaliação difusa abrangente, *fuzzy comprehensive evaluation*, para um bom controlo do risco, utilizando o método AHP. O objeto de estudo foi um campo petrolífero situado na China Ocidental. Durante o processo, identificaram-se os fatores de risco e os respetivos pesos através dos métodos Delphi e AHP. Foram utilizados quatro fatores de risco: incerteza geológica, bom controlo de equipamento, técnicas e operações e a qualidade dos funcionários. Para estes fatores selecionaram-se catorze subfatores, distribuídos pelos fatores de risco de acordo com as suas características. Por exemplo, o fator de risco qualidade dos funcionários, incorpora

como subfatores as qualidades físicas, psicológicas e as perícias dos funcionários. De acordo com a análise dos resultados da avaliação, obtém-se uma predição de uma boa gestão de risco. Os autores determinaram que o fator que apresenta um risco mais elevado é a incerteza geológica e concluíram que este tipo de avaliação é realmente praticável [17].

Qiuju You (2014) pretendia obter uma avaliação de risco mais objetiva dos sistemas de gás natural e portanto, recorreu a modelos difusos para esse objetivo. O estudo analisa possíveis fatores causadores de acidentes nas tubagens que transportam gás natural: intervenção de terceiros, corrosão, fatores de projeto e falhas de operação. Associados a estes fatores existem treze subfatores, tais como, o estado dos equipamentos, a corrosão interna e externa, o fator de fadiga, entre outros. Os efeitos destes fatores de risco dependem do tempo e da localização, pelo que são caracterizados como fatores difusos, pelo autor. Após a aplicação do método AHP realiza-se uma avaliação abrangente difusa. O estudo envolve duas tubagens localizadas em áreas diferentes, de diferentes comprimentos e que diferem no número de clientes que abastecem. O objetivo é comparar o grau de risco das duas tubagens de forma a determinar qual a mais segura. O autor conclui que, aplicando o processo AHP em simultâneo com conceitos de matemática difusa, consegue considerar os vários fatores que têm impacto na segurança do sistema de gás natural, uma vez que combina uma análise quantitativa e qualitativa, revelando uma maior proximidade com a realidade [23].

Os acidentes na indústria química despertaram o interesse do autor Ying Lu (2015), para o estudo do risco das cadeias de fornecimento de produtos químicos que são influenciadas por diversos fatores de risco. O autor caracteriza a cadeia química, combinando uma metodologia quantitativa com uma qualitativa. Aplica o método AHP para realizar uma avaliação quantitativa e utiliza uma avaliação difusa abrangente para realizar uma avaliação qualitativa. O autor considera a existência de cinco fatores de risco: riscos na produção, no transporte, na cooperação, na contaminação e riscos ambientais. Associados a estes fatores existem quinze subfatores, como por exemplo, os riscos morais que estão associados ao risco de cooperação, os desastres naturais e os regulamentos e lei que estão associados aos riscos ambientais. Após aplicada a metodologia referida e analisados os respetivos resultados, o autor depreende que o risco da cadeia de fornecimento de produtos químicos considerada é relativamente baixo. Como conclusão, observa que a validade e valor científico podem ser comprovados através da comparação entre a avaliação dos resultados provenientes do modelo com os resultados atuais [10].

2.2 Processo Hierárquico Analítico

As ações mais usuais do nosso dia-a-dia resultam de algum tipo de decisão, que poderá ter sido tomada de forma consciente ou inconsciente. Efetivamente, quando tomamos uma decisão de forma consciente, tentamos avaliar os prós e contras, considerando as consequências decorrentes dessa decisão, de forma a tomarmos a decisão que melhor se ajusta às nossas necessidades. Num mundo em constante evolução, os tomadores de decisão procuram instrumentos analíticos e quantitativos como auxílio à obtenção da melhor decisão possível.

O Processo Hierárquico Analítico, desenvolvido por Thomas Saaty em 1980, é uma técnica estruturada para análise, organização e tomada de decisões complexas. Trata-se de um método associado à técnica de apoio à tomada de decisão, *Multiple-Criteria Decision Making (MCDM)*, utilizado por diversos agentes e em inúmeras áreas, das quais destacamos o governo, a indústria, cuidados de saúde e a educação [13].

Na utilização do processo AHP, o problema é representado através de uma estrutura hierárquica de decisão, resultante da segmentação do problema de decisão em subproblemas mais pequenos e menos complicados de manobrar. Através da utilização de comparações emparelhadas, baseadas em classificações concebidas por peritos sobre um determinado tema, obtêm-se escalas de prioridades apresentadas sob a forma de um vetor de pesos. As comparações são obtidas através da utilização de uma escala de avaliações absolutas, com a qual se pretende representar o quanto um elemento domina o outro, relativamente a um determinado atributo [18]. A experiência e sabedoria dos peritos é primordial, na medida em que permite capturar o ponto de vista dos decisores de diferentes domínios, o que contribui para a credibilidade e qualidade da decisão final. Além da experiência, dos conhecimentos e de um comportamento ético por parte dos peritos é necessário conhecer o problema, a sua necessidade e propósito, assim como os critérios e subcritérios associados à decisão, os grupos afetados pela mesma e as medidas alternativas a tomar [18].

O principal interesse na utilização do processo AHP, não é a determinação de valores exatos para quantidades, mas sim da proporção entre essas quantidades.

Exemplo 2.2.1. *Suponhamos que temos duas pedras A e B e pretendemos caracterizar os pesos, em kg, das pedras (m_A, m_B). No contexto da medição clássica, pretendemos conhecer o peso exato das pedras. O par (2,1) estaria correto desde que a pedra A pesasse 2kg e a pedra B, 1kg. No contexto da medição relativa, interessa-nos saber a relação entre os pesos das duas pedras, isto é, o quanto é que a pedra A é mais pesada do que a B. Neste cenário, o par (2,1) estaria correto desde que a pedra A pesasse duas vezes mais do que a pedra B [2].*

Em resumo, o método AHP é um método sistemático para a tomada de decisões que engloba técnicas quantitativas e qualitativas, para o qual, o pretendido não é a determinação da decisão mais correta, mas sim, da que melhor se ajusta às necessidades do decisor [18].

As diferentes etapas do Processo Hierárquico Analítico

A análise de decisão está desenhada para ajudar um indivíduo ou um grupo de indivíduos a tomar uma decisão quando tem um leque de alternativas para escolher.

A escolha dos fatores e subfatores associados a um problema é a tarefa mais importante quando se pretende tomar uma decisão. Os peritos podem listar todos os fatores e subfatores que pensam ser importantes e um mediador - pessoa imparcial que poderá ser ou não perita no assunto - estabelece as relações entre os mesmos, propondo uma hierarquia a discussão e possível modificação. Uma outra forma de recolher os fatores e subfatores poderá ser com recurso à literatura e à realização de entrevistas a peritos. Existe ainda a possibilidade de combinar os dois processos que foi a direção seguida na elaboração do caso de estudo que será abordado no capítulo 3. Acrescenta-se que a recolha dos fatores pode ser realizada por diferentes vias, como por exemplo, através de reuniões presenciais com os peritos, nas quais são discutidos os fatores relevantes para o problema, por votação online ou pelo preenchimento de questionários [7].

Nos processos de tomada de decisão existe um objetivo e um conjunto de alternativas, entre as quais o tomador de decisão pretende escolher a melhor. O processo inicia-se pela decomposição do problema numa estrutura hierárquica de critérios, para que possam ser facilmente analisáveis e comparáveis de forma independente. Trata-se duma estrutura descendente de níveis, tendo no topo o objetivo, *goal*, seguido dos critérios que podem ser ou não divididos em subcritérios e, por fim, as alternativas. O processo desenvolve-se de forma a que a importância de cada par de critérios seja comparada em relação ao objetivo

de decisão e cada par de subcritérios, relativamente ao critério associado. Com base na literatura, recomenda-se que o número de critérios e subcritérios esteja entre 3 e 5, de forma a que hierarquia esteja bem estruturada [7].

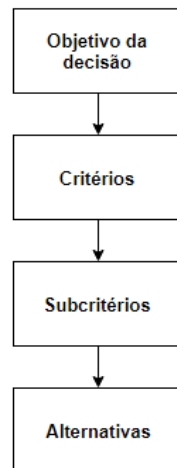


Figura 2.1: Componentes de uma estrutura hierárquica de decisão

Existem quatro pontos fundamentais na aplicação do método AHP:

1. Definir o problema e o objetivo correspondente, determinando o tipo de conhecimento associado necessário;
2. Representar o problema através de uma estrutura hierárquica de decisão, na qual o objetivo está presente no nível mais elevado da hierarquia. O primeiro nível intermédio corresponde aos critérios quantitativos ou qualitativos que são significativos para os tomadores de decisão. Caso seja necessário, poderá existir um segundo nível intermédio para o qual cada critério poderá ser dividido num conjunto de subcritérios. O nível mais baixo da hierarquia é constituído pelas alternativas. Na figura 2.2 encontra-se um exemplo de uma estrutura hierárquica de decisão.
3. Construção das matrizes de comparação com base nas comparações emparelhadas dos critérios e dos subcritérios, caso existam, realizadas por peritos com conhecimento e experiência no objetivo de decisão em questão;
4. Realização de um teste da consistência das avaliações realizadas pelos peritos e determinação dos pesos relativos a cada nível da estrutura hierárquica, o que permite

a avaliação de cada um dos elementos dentro da hierarquia.

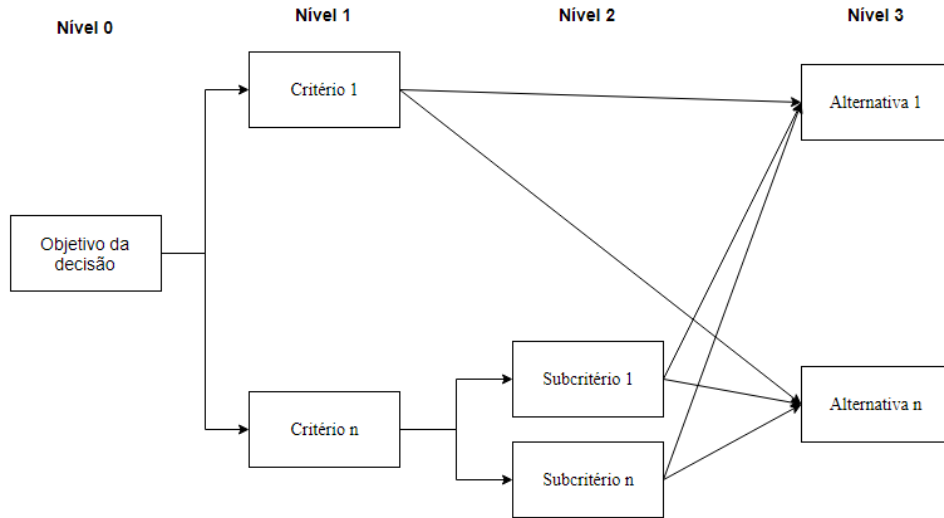


Figura 2.2: Exemplo de uma estrutura hierárquica de decisão [9]

Primeiramente, é fundamental especificar qual a nomenclatura que será utilizada no decorrer da dissertação, a qual tem como base a nomenclatura adotada pelo autor do artigo *Fuzzy Comprehensive Evaluation in Well Control Risk Assessment Based on AHP: A Case Study* [17].

Nomenclatura

G = Objetivo da decisão, *goal*

B_1, \dots, B_n = Primeiro nível da hierarquia constituído pelos critérios

C_1, \dots, C_k = Segundo nível da hierarquia constituído pelos subcritérios

A = Matriz de comparação dos n critérios: B_1, \dots, B_n

W = Vetor constituído pelos pesos dos critérios presentes no primeiro nível da hierarquia

W_i = Vetor constituído pelos pesos do conjunto dos subcritérios presentes no segundo nível da hierarquia e associados ao critério B_i

V = Conjunto de avaliação difusa

R = Matriz de avaliação dos critérios presentes no primeiro nível da hierarquia

R_i = Matriz de avaliação do conjunto de subcritérios presentes no segundo nível da hierarquia e associados ao critério B_i

D = Matriz de avaliação final de risco (trata-se da matriz resultante do processo de avaliação difusa abrangente)

D_i = Matriz de avaliação correspondente ao critério B_i

De agora em diante explicitaremos o processo apenas para o primeiro nível da hierarquia, uma vez que para os restantes níveis o processo é análogo. No capítulo 3 os passos do processo serão evidenciados através da aplicação do método a um caso de estudo.

Nesta fase estão reunidas as condições para discriminar os passos necessários para a aplicação do método. O processo inicia-se pela determinação do conjunto de critérios B , representado na equação (2.1):

$$B = \{B_1, B_2, \dots, B_i, \dots, B_n\} \quad (2.1)$$

onde B representa o conjunto de critérios, B_i corresponde ao i -ésimo critério e n é o número total de critérios presentes no primeiro nível da estrutura hierárquica.

No caso de existirem subcritérios associados aos critérios é necessário definir os conjuntos de subfatores. Este processo é análogo ao realizado anteriormente com os critérios.

Na fase seguinte, cada perito, através da realização de comparações emparelhadas para cada dois critérios, elege o critério mais importante entre os dois e classifica essa relação de importância. Analogamente, a importância de cada par de subcritérios, associados a um determinado critério, também é comparada.

Com o método AHP é possível comparar variáveis consideradas *a priori* incomparáveis. A comparação entre variáveis qualitativas e quantitativas é possível, dado que as variáveis passam a ser caracterizadas pelo conhecimento e experiência dos peritos, podendo inclusive, ser determinada a variável mais importante entre cada duas.

Para realizar uma comparação necessitamos de uma escala. Uma das escalas mais utilizadas na aplicação do processo AHP é a escala de Saaty, representada pela tabela 2.1. Em primeiro lugar entre cada dois critérios elege-se o critério de maior importância e de seguida é utilizado um número inteiro entre 1 e 9 para caracterizar a dominância desse critério sob o outro, com base na escala de Saaty, tabela 2.1. A atribuição do número 1 indica que os critérios em questão contribuem de forma semelhante para o objetivo. Caso seja escolhido o número 9, então um critério é absolutamente predominante para o objetivo, dominando por completo o outro critério. Os recíprocos de 1 a 9 também são utilizados para quantificar a comparação inversa.

Escala	Definição	Descrição
1	Igual importância	Os fatores contribuem de forma idêntica para o objetivo
3	Fraca importância	A análise e experiência mostram que um fator é ligeiramente mais importante do que o outro
5	Forte importância	A análise e a experiência mostram que um dos fatores é claramente mais importante do que o outro
7	Muito forte importância	A análise e a experiência mostram que um dos fatores é predominante para o objetivo
9	Importância absoluta	Sem qualquer dúvida que um dos fatores é absolutamente predominante para o objetivo
2,4,6,8 Valores intermédios aos anteriores	Valores intermédios	Podem ser utilizados como classificações intermédias quando existe dúvida

Tabela 2.1: Escala fundamental de Saaty

Considere-se que o elemento i é k vezes mais importante do que o elemento j , isto é, $a_{ij} = k$. Então o elemento j é $\frac{1}{k}$ vezes mais importante do que o elemento i , isto é, $a_{ji} = \frac{1}{k}$.

Exemplo 2.2.2. *Considere-se que a análise e experiência dos peritos revelam que o fator i é ligeiramente mais importante do que o fator j . Esta afirmação corresponde à atribuição do grau 3 para a comparação dos fatores i com j , na escala de Saaty, 2.1. Consequentemente, a comparação inversa, ou seja, a comparação dos fatores j com i , na escala de Saaty, corresponderá ao grau de preferência $1/3$.*

Após realizarmos todas as comparações emparelhadas, estas são agrupadas numa matriz de comparação, $A = (a_{ij})_{n \times n}$, representada da seguinte forma:

$$\begin{array}{c} B_1 \quad B_2 \quad \dots \quad B_n \\ \\ A = \begin{array}{c} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{array} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \end{array} \quad (2.2)$$

onde $a_{ij} > 0$ representa o grau de importância associado à comparação do fator i com o fator j . Assume-se que o elemento da linha i é sempre comparado com o elemento da coluna j e portanto, a_{ij} indica o quanto o elemento i é mais, ou menos, importante do que o elemento j . Considerando que existem n elementos, então o número de comparações necessário é $\frac{n(n-1)}{2}$, a partir das quais se constrói a matriz de comparação A de dimensão $n \times n$.

As matrizes de comparação satisfazem as seguintes propriedades:

$$a_{ij} > 0 \quad (2.3)$$

$$a_{ii} = 1 \quad (2.4)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (2.5)$$

Uma matriz de comparação A que verifique as propriedades (2.3) e (2.5) denomina-se positiva e recíproca, respetivamente. Salienta-se que o exemplo 2.2.2 referido previamente está em conformidade a propriedade (2.5).

De forma a interpretar a informação existente na matriz de comparação, atribuem-se pesos relativos a cada critério. O peso de cada critério permite a avaliação desse critério dentro da hierarquia, relativamente a outros critérios.

Definindo

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}, \quad \forall i, j \quad (2.6)$$

podemos reescrever a matriz de comparação (2.2):

$$A_{n \times n} = \left(\frac{w_i}{w_j} \right)_{n \times n} = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Considerando a relação (2.6) e a condição da reciprocidade multiplicativa, definida pela propriedade (2.5), podemos reescrever a matriz de comparação enunciada em (2.7) numa forma ainda mais simplificada:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Existem diversos métodos na literatura para determinar os pesos dos critérios. Nesta dissertação destacamos os dois métodos mais usuais: o do vetor próprio e o da média geométrica [2].

Método do vetor próprio

O método do vetor próprio foi proposto por Saaty e trata-se do mais popular na estimação dos pesos dos critérios e subcritérios. O vetor dos pesos de uma matriz de comparação A corresponde ao vetor próprio associado ao maior valor próprio de A .

Considere-se a matriz A , representada em (2.7), cujos elementos correspondem aos rácios dos pesos associados a cada critério. Multiplicando a matriz A pelo vetor dos pesos w , com $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, obtemos a seguinte relação:

$$Aw = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nw_1 \\ nw_2 \\ \vdots \\ nw_n \end{bmatrix} = nw.$$

De acordo com a *álgebra linear*, a relação $Aw = nw$ implica que n seja um valor próprio de A e w o vetor próprio correspondente. Ora, se w é um vetor próprio de A , então todos os vetores da forma αw com $\alpha \in \mathbb{R}$ também são vetores próprios da matriz de comparação A .

Assim, para obtermos o vetor de pesos, temos de resolver a equação $Aw = nw$, ou seja, encontrar um vetor próprio w de A , associado a um valor próprio n .

Os valores próprios da matriz A são exatamente as raízes do seu polinômio característico, $\rho_A(\lambda)$, definido por,

$$\rho_A(\lambda) = \det(A - \lambda I) \quad (2.9)$$

No entanto, neste caso, não é necessário calcular as raízes de um polinômio característico, como veremos de seguida.

Definição 2.2.1. *Considere-se o produto dos elementos a_{ij} com a_{jk} . De acordo com a relação (2.6),*

$$a_{ij}a_{jk} = \frac{w_i}{w_j} \frac{w_j}{w_k} = \frac{w_i}{w_k} = a_{ik}, \quad \forall i, j, k.$$

Portanto, se todos os elementos de A satisfazem a relação $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$, então verifica-se a seguinte propriedade de transitividade:

$$a_{ik} = a_{ij}a_{jk} \quad \forall i, j, k.$$

Uma matriz cujos elementos verificam a condição de transitividade referida denomina-se por matriz consistente.

Se as avaliações dos decisores forem consensuais, verificar-se-á a propriedade de transitividade definida em 2.2.1. O exemplo 2.2.3 traduz uma situação de inconsistência.

Exemplo 2.2.3. *Considere-se que se pretende comparar a idade de três pessoas, representadas por x_1, x_2 , e x_3 . Suponha-se que o decisor afirma que x_1 tem o dobro da idade de x_2 ($a_{12} = 2$) e o triplo da de x_3 ($a_{13} = 3$). Além disso, x_2 tem o triplo da idade de x_3 ($a_{23} = 3$). Efetivamente existe uma contradição, uma vez que se $a_{12} = 2$ e $a_{23} = 3$, então $a_{13} = a_{12} \cdot a_{23} = 6 \neq 3$.*

Recorde-se que, de acordo com a propriedade (2.5), a matriz A é recíproca. Decorrente desta propriedade e da definição 2.2.1, depreende-se que todas as linhas da matriz A são combinação linear da primeira e, por conseguinte, todos os valores próprios associados são nulos exceto um.

Considere-se as seguintes propriedades relacionadas com uma matriz de comparação A de dimensão $n \times n$.

1. A matriz A tem n valores próprios.
2. O traço da matriz A corresponde à soma de todos os elementos da diagonal principal de A ,

$$\text{tr}(A) = a_{11} + a_{22} + \dots + a_{nn} \quad (2.10)$$

3. O traço da matriz A é igual à soma dos seus valores próprios,

$$tr(A) = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n. \quad (2.11)$$

Sabe-se que todos os valores próprios de A são nulos exceto um e que, pela propriedade (2.4), os elementos da diagonal da matriz A são 1. Recorrendo à propriedade (2) do traço,

$$tr(A) = a_{11} + a_{22} + \dots + a_{nn} = 1 + 1 + \dots + 1 = n \quad (2.12)$$

Consequentemente, pela propriedade do traço 2.11,

$$tr(A) = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = n. \quad (2.13)$$

Assim se conclui que o único valor próprio diferente de zero corresponde a $\lambda = n$. Uma vez que os elementos da matriz A correspondem a rácios de pesos, então o vetor dos pesos é o vetor próprio de A , associado ao valor próprio n .

Saaty generalizou este resultado ao caso em que,

$$a_{ij} \approx \frac{w_i}{w_j}, \quad \forall i, j \quad (2.14)$$

propondo que o valor próprio n fosse substituído pelo maior valor próprio em valor absoluto, $\lambda_{máx}$. Uma vez que neste caso já não se tem (2.13), os valores próprios de A podem ser ordenados de acordo com o seu valor absoluto. Neste caso, o vetor dos pesos w associado a uma matriz de comparação A , é obtido através da resolução do seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} Aw = \lambda_{máx} w \\ w^T 1 = 1 \end{cases}$$

onde $\lambda_{máx}$ é o maior valor próprio de A e $1 = (1, \dots, 1)^T$ [2].

Método da Média Geométrica

A utilização do método da média geométrica para determinar os pesos da matriz de comparação é outro método muito usual. De acordo com este método, cada elemento w do vetor de pesos é obtido através da média geométrica dos elementos duma determinada linha da matriz, dividido por um termo de normalização, tal como indica a fórmula

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (2.15)$$

Da aplicação da fórmula (2.15) resulta o vetor W , representado em (2.16). Cada elemento w_i do vetor W representa o peso de um determinado critério da matriz de comparação A .

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (2.16)$$

O método da média geométrica é mais apelativo do que o método dos vetores próprios, uma vez que os pesos são determinados diretamente a partir dos elementos da matriz de comparação A .

Testes de Consistência

A próxima etapa é a verificação da consistência das matrizes de comparação. Pretende-se verificar se as opiniões dos decisores são consistentes para a tomada de decisão. Nesta fase, as comparações emparelhadas dos critérios e dos subcritérios, que estão agrupados de acordo com o critério ao qual estão associados, estão concluídas e as respetivas matrizes de comparação estão construídas.

Considere-se uma matriz de comparação A . A matriz A é consistente se e só se o maior valor próprio de A é igual a n , ou seja, $\lambda_{\max} = n$ e os restantes valores próprios são nulos [2].

No caso da matriz de comparação A ser inconsistente, o seu maior valor próprio é superior ou igual a n , $\lambda_{\max} \geq n$. Assumindo que w_i e w_j são medidas precisas e que a

avaliação do perito está em conformidade com essa medida, então:

$$a_{ij} \frac{w_j}{w_i} = 1; \quad (2.17)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \frac{w_j}{w_i} = n, \quad (i=1, \dots, n). \quad (2.18)$$

Geralmente, as condições referidas em (2.17) e (2.18) não se verificam e tem-se que, de acordo com a teoria de Saaty, cada entrada da matriz corresponde à aproximação do rácio entre dois pesos, tal como referido em (2.14). Represente-se por ϵ o desvio que existe entre uma medição precisa e a avaliação do perito, então:

$$a_{ij} = (1 + \epsilon) \frac{w_i}{w_j}, \quad (2.19)$$

onde $\epsilon > -1$. Para medir o desvio entre a matriz inconsistente A e a matriz de comparação consistente, utiliza-se o seguinte índice de consistência, CI introduzido por Saaty:

$$CI = \frac{\lambda_{máx} - n}{n - 1} \quad (2.20)$$

No caso de consistência, $\lambda_{máx} = n$ e portanto $CI = 0$. Se $CI \rightarrow 0$, então pode ser afirmado que $a_{ij} \rightarrow \frac{w_i}{w_j}$ ou $\epsilon = a_{ij} \frac{w_j}{w_i} \rightarrow 1$.

No caso de inconsistência seja $\lambda_{máx} = \lambda_1$. Portanto os valores próprios de A são $\lambda_{máx}, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$.

Além disso, sabe-se que

$$n = \lambda_{máx} + \sum_{i=2}^n \lambda_i \Leftrightarrow n - \lambda_{máx} = \sum_{i=2}^n \lambda_i \quad (2.21)$$

Portanto, $CI = -\frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n \lambda_i$, que corresponde à média negativa dos valores próprios de A , exceto $\lambda_{máx}$. Em forma de resumo, $\lambda_{máx} - n$ expressa o desvio entre a matriz inconsistente e a matriz de comparação consistente. Dividimos este valor por $n - 1$, uma vez que nos referimos à inconsistência introduzida pelas raízes diferentes de $\lambda_{máx}$.

Quando se utiliza CI para comparar matrizes de diferentes ordens, geralmente CI aumenta com o aumento da dimensão da matriz. Como consequência, foi necessário um reajustamento deste índice, o que levou à criação do rácio de consistência, CR [2]. O rácio de consistência (CR) foi proposto por Saaty como uma forma de validar o índice de consistência (CI).

Dada uma matriz A de ordem n , o rácio de consistência, CR , pode ser obtido dividindo CI por RI_n , onde RI_n corresponde a uma estimativa da média de CI , obtida através de uma amostra suficientemente grande de matrizes de ordem n , geradas aleatoriamente. Assim sendo, a fórmula do rácio de consistência é dada por,

$$CR = \frac{CI}{RI_n}. \quad (2.22)$$

Na tabela 2.2 consta uma estimativa dos valores do índice aleatório, RI , de acordo com a ordem da matriz.

Sumarizando, a verificação da consistência das matrizes de comparação pode ser realizada através de um teste denominado por teste de consistência, repartido em três fases:

1. Cálculo do maior valor próprio da matriz de comparação A ,

$$\lambda_{máx} = \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{nw_i} \quad (2.23)$$

2. Cálculo do índice de consistência (CI),

$$CI = \frac{\lambda_{máx} - n}{n - 1} \quad (2.24)$$

3. Cálculo do rácio de consistência (CR),

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2.25)$$

Na equação (2.25), o índice de consistência aleatório (RI) é um valor que varia de acordo com a dimensão da matriz de comparação, ou seja, de acordo com o número de fatores que se pretende comparar. A relação mais usual, encontrada na literatura [17], entre a dimensão da matriz de comparação e os possíveis valores de RI , encontra-se representada na tabela 2.2.

Ordem da matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

Tabela 2.2: Índice de consistência aleatório

Através do rácio de consistência, constata-se se cada comparação emparelhada é consensual com as restantes, indicando o grau para o qual, as comparações emparelhadas se assemelham a um conjunto aleatório. Se o valor do CR for 0, então estamos perante respostas consistentes, se CR for inferior a 0.1 são consideradas aceitáveis, para o caso de CR estar compreendido entre 0.1 e 0.2 são toleráveis e para valores de CR superiores a 0.2 as avaliações deverão ser sujeitas a revisão, podendo ser excluídas. No caso de $CR > 0.2$, é pedido aos peritos que verifiquem se ocorreu algum engano ou que reconsiderem as suas respostas [7].

Retroceda-se para o processo de determinação dos pesos das matrizes de comparação. Na literatura, no que se relaciona com eleger o método mais adequado para a determinação do vetor dos pesos, os autores dividem-se em dois grupos: os que defendem o método dos vetores próprios e os que defendem o método da média geométrica.

Alguns autores afirmam que o método da média geométrica é o único método capaz de obter o vetor dos pesos da matriz de comparação, satisfazendo as condições de consistência. Além disso, existem alguns casos na literatura, de matrizes de comparação para as quais o método dos vetores próprios não preserva a condição de transitividade. Considere-se que x_i domina x_j mais do que x_k domina x_l . Ou seja, $a_{ij} > a_{kl}$ e seria natural que $\frac{w_i}{w_j} > \frac{w_k}{w_l}$. Existem exemplos para os quais esta condição não é respeitada, embora exista efetivamente outro vetor que a satisfaça [2].

Tendo em consideração as observações referidas, utilizar-se-á o método da média geométrica para a determinação do vetor dos pesos no caso de estudo presente no capítulo 3.

Agregação de respostas individuais

A aplicação do método AHP é bastante mais complexa quando se considera um grupo de decisores em vez de um decisor [24].

Uma questão muito importante na tomada de decisão em grupo, consiste na forma de agregar as avaliações individuais numa única avaliação que represente a opinião de todos os peritos do grupo. A reciprocidade dos elementos da matriz de comparação é fulcral para combinar as avaliações dos diversos peritos, de forma a obter uma única avaliação para o grupo. As avaliações devem ser combinadas de forma a que o recíproco das avaliações sumarizadas seja igual à sumarização das avaliações dos recíprocos. Para realizar este tipo de agregação, respeitando estas condições, utiliza-se a média geométrica. Contudo, os

peritos podem não querer que as suas avaliações sejam agregadas, mas sim os resultados finais obtidos pelas respectivas hierarquias. Caso seja este o pretendido, utiliza-se também a média geométrica dos resultados finais [18]. Na tomada de decisão de um grupo de peritos, suponha-se que existem n critérios e m decisores. As matrizes de comparação e vetores de pesos associados podem ser escritos da seguinte forma:

$$\begin{cases} A^{(k)} = (a_{ij}^{(k)})_{n \times n}, & k = 1, \dots, m \\ w^k = (w_1^k, \dots, w_n^k)^T \end{cases}$$

A importância da avaliação do k -ésimo perito pode ser representada por α_k , para $k = 1, \dots, m$, com $\alpha_k > 0$ e $\sum_{k=1}^m \alpha_k = 1$. De forma a agregar os pesos relativos de cada um dos peritos utiliza-se o método da média aritmética ponderada, *weighted arithmetic mean method* (WAMM), e o método dos vetores próprios para obter os vetores dos pesos para cada decisor. A agregação dos pesos é dada por

$$w_i = \sum_{k=1}^m \alpha_k w_i^k, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.26)$$

Caso o pretendido seja agregar as avaliações individuais, utiliza-se o método da média geométrica ponderada, *weighted geometric mean method* (WGMM). Deste método resulta a matriz de comparação $A^{WGM} = (a_{ij}^{WGM})_{n \times n}$, para a qual cada elemento corresponde à média ponderada das avaliações individuais $a_{ij}^{WGM} = \prod_{k=1}^m (a_{ij}^{(k)})^{\alpha_k}$, de forma a representar a opinião do grupo [24].

A consistência da matriz resultante da agregação das avaliações individuais, através do método WGMM, é razoável se a consistência das matrizes correspondentes às avaliações individuais também for aceitável [21]. Observe-se que a matriz resultante é recíproca, consistente e possui os elementos da diagonal principal iguais a 1 [3].

O próximo capítulo aborda uma metodologia alternativa que combina princípios do Processo Hierárquico Analítico com conceitos da matemática difusa.

2.3 Processo Hierárquico Analítico Difuso

O Processo Hierárquico Analítico Difuso, *Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)*, é uma derivação do Processo Hierárquico Analítico (AHP) e trata-se de uma metodologia alternativa que combina princípios do método AHP com a teoria de conjuntos difusos [8]. Em 1965, Lotfi A. Zadeh propôs a modelação do mecanismo de pensamento através de valores difusos ao invés de números, o que conduziu à introdução do conceito de difuso na teoria de conjuntos, *fuzzy sets* [22].

O aumento da complexidade de um sistema resulta numa diminuição da nossa capacidade de realizar afirmações de forma precisa. Os conjuntos difusos lidam com o tipo de incerteza em que os limites duma classe de objetos não estão definidos de forma precisa. Assim, um conjunto difuso tem mais poder expressivo do que um “simples” número [22].

Um objetivo da matemática difusa, *fuzzy mathematics*, consiste na avaliação do grau de incerteza [20]. Para tal,

1. Combinam-se dados quantitativos com informação qualitativa;
2. Estabelecem-se formas operacionais baseadas em modelos linguísticos;
3. Introduzem-se conceitos estatísticos baseados na matemática difusa.

O estado de saúde de um ser humano, a classificação de pacientes como deprimidos e até mesmo rotular uma pessoa como “jovem”, são alguns exemplos da possível utilização de conceitos difusos.

Exemplo 2.3.1. *Considere-se um conjunto de pessoas, onde existe um subconjunto de indivíduos com depressão. Pode ser impossível decidir se um indivíduo pertence a esse subconjunto ou não. Na realidade, forçar uma resposta para que seja do tipo “sim ou não” é possível e é até recorrente, mas este tipo de resposta pode implicar a perda de informação, tal como pode ser constatado neste exemplo, uma vez que não é considerado o grau de depressão.*

Um subconjunto A de um conjunto U fica determinado pela sua função indicatriz, χ_A , definida por:

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$$

A função χ_A determina se um elemento está ou não em A , existindo desta forma apenas duas opções possíveis. Na matemática difusa acontece uma generalização desta noção, de forma a permitir que as imagens dos elementos estejam no intervalo $[0, 1]$, possibilitando outras opções que não apenas 0 e 1.

Definição 2.3.1. *Um conjunto difuso pode ser descrito como a família de pares, $R = \{(x, \mu_R(x))\}$, onde x é um elemento de um conjunto de referência X , μ_R é a função de pertença do conjunto difuso R e $\mu_R(x)$ corresponde ao valor do grau de pertença, membership degree, de x no conjunto difuso R . A função de pertença μ_R transforma os elementos de um domínio X no intervalo $[0, 1]$, ou seja, $\mu : X \rightarrow [0, 1]$.*

A função de pertença associada a um conjunto difuso R , μ_R , permite definir as fronteiras de R . Se $\mu_R = 1$, então x pertence completamente ao conjunto difuso R . No caso de $\mu_R = 0$, então x não pertence ao conjunto difuso R . Por fim, quando μ_R está entre 0 e 1, $\mu_R(x)$ representa o grau de pertença de x conjunto difuso R .

Definição 2.3.2. *As funções cujas imagens estão contidas no conjunto de dois elementos $\{0, 1\}$ correspondem a um caso particular dos subconjuntos de X , denominados subconjuntos crisp.*

Exemplo 2.3.2. *Considere-se que R representa o conjunto difuso das pessoas jovem. Então, $\mu_R(x)$ corresponde ao grau de pertença de x ao conjunto R , ou seja, ao grau de juvenilidade que foi atribuído a cada elemento de X .*

Seja Y uma possível função de pertença muito simples associada à “juvenilidade” de acordo com a noção de jovem de um adolescente,

$$Y(x) = \begin{cases} 1, & x < 25 \\ \frac{40-x}{15}, & 25 \leq x \leq 40 \\ 0, & 40 < x \end{cases}$$

Esta função de pertença representada-se pelo gráfico 2.3 [15].

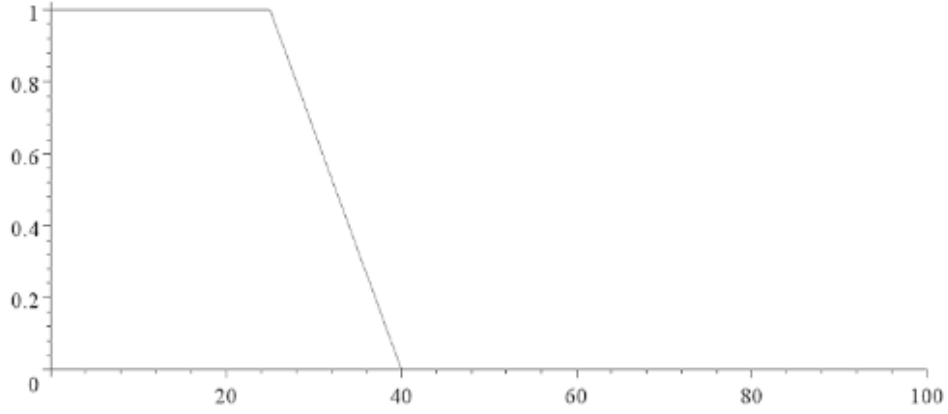


Figura 2.3: Função de pertinência associada à “juvenilidade”

Provavelmente uma pessoa idosa modelaria a “juvenilidade” de forma diferente, o que levaria a uma outra função de pertinência. Na modelação do conceito “juvenilidade” como um subconjunto difuso torna-se possível descrever matematicamente esse conceito. Trata-se de uma função que pode ser manipulada matematicamente e combinada com outras funções.

Existem diversas funções de pertinência, entre as quais se destacam a triangular, a trapezoidal, a gaussiana e a sigmoidal, ilustradas nos gráficos 2.4 [1].

A função de pertinência triangular, $\mu_{triangular}(x; a, b, c)$ possui três parâmetros, a, b e c correspondentes aos três vértices de um triângulo e é definida da seguinte forma,

$$\mu_{triangular}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x < c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$$

A função de pertinência trapezoidal, $\mu_{trapezoidal}(x; a, b, c, d)$, apresenta quatro parâmetros, a, b, c e d correspondentes aos quatro vértices do trapézio.

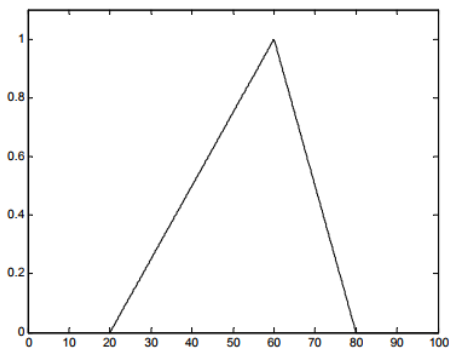
$$\mu_{trapezoidal}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & d < x \end{cases}$$

A função de pertença gaussiana, $\mu_{gaussiana}(x; \sigma, m)$, possui dois parâmetros: um fator de largura σ e o centro m . Esta função apresenta a forma da distribuição normal.

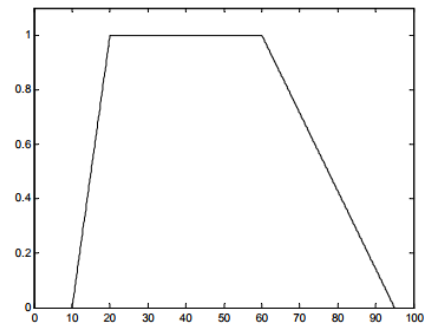
$$\mu_{gaussiana}(x; \sigma, m) = \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right\}$$

A função de pertença sigmoidal, $\mu_{sigmoidal}(x; a, c)$, apresenta dois parâmetros a e c , onde a controla a inclinação da curva no ponto de passagem c . O ponto de passagem c é o ponto para o qual a função de pertença toma o valor 0.5, ou seja, $\mu(x) = 0.5$.

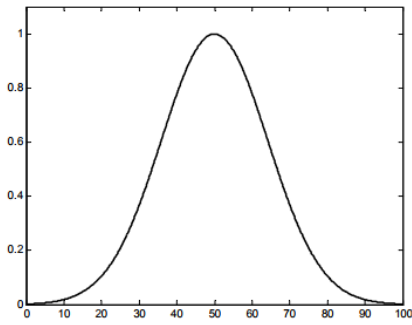
$$\mu_{sigmoidal}(x; a, c) = \frac{1}{1 + \exp\{-a(x-c)\}}$$



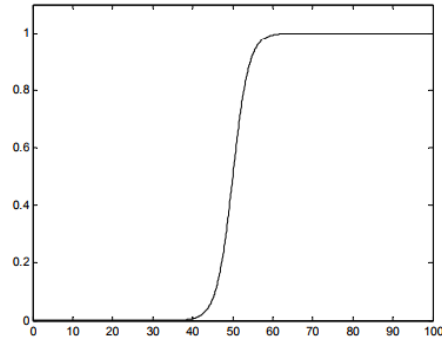
(a) Função de pertença triangular com valores $(x; 20, 60, 80)$



(b) Função de pertença trapezoidal com valores $(x; 10, 20, 60, 95)$



(c) Função de pertença gaussiana com valores $(x; 20, 50)$



(d) Função de pertença sigmoidal com valores $(x; 0.5, 50)$

Figura 2.4: Principais funções de pertença

Das funções de pertença mencionadas, a triangular é a mais utilizada devido à sua simplicidade e ao seu reduzido custo computacional.

De seguida mencionam-se alguns conceitos essenciais para compreender o desenvolvimento do Processo Hierárquico Analítico Difuso.

Definição 2.3.3. O corte- α , “ α -Cut”, de um conjunto difuso R , denomina-se R_α e consiste no conjunto de elementos de X cujos graus de pertença são maiores ou iguais do que o valor $\alpha \in [0, 1]$. Podemos definir R_α como sendo o conjunto,

$$R_\alpha = \{x \in X \mid \mu_R(x) \geq \alpha\}. \quad (2.27)$$

Probabilidades e graus de pertença são conceitos distintos.

Geralmente a aleatoriedade é modelada através da teoria de probabilidades. Neste domínio assume-se que os resultados correspondem a observações de variáveis aleatórias que apresentam funções de distribuição que podem, ou não, ser conhecidas. Além disso, a cada variável aleatória corresponde uma única função de distribuição. Na teoria de conjuntos difusos, em contrapartida, a cada conceito difuso podem estar associadas inúmeras funções de pertença. Novamente, “probabilidades e graus de pertença são conceitos distintos”.

Exemplo 2.3.3. A lógica probabilística é utilizada em situações em que os acontecimentos são verdadeiros ou falsos e a informação disponível está incompleta, impedindo a sua determinação. As proposições corresponderão a acontecimentos e a probabilidade de um acontecimento é utilizada como medida da verdade da sua proposição correspondente.

Considere-se a determinação dum intervalo de confiança.

Seja X uma variável aleatória cujo parâmetro de interesse é a média da população, que é desconhecida.

De uma amostra aleatória da população estima-se o parâmetro populacional μ utilizando um estimador para a média. Ora, o valor do parâmetro estimado, geralmente não é igual ao valor verdadeiro da média da população. Como μ pode ou não pertencer à amostra, estabelecem-se limites que apresentam uma certa probabilidade de incluir o verdadeiro valor do parâmetro. Com estes limites construímos um intervalo de confiança, o mais pequeno possível, para que seja bastante provável que μ pertença a esse intervalo.

Seja α um número fixo com $0 < \alpha < 1$. O que se pretende, é determinar um intervalo, denote-se por A , que contenha a média da população com $(1 - \alpha)100\%$ de confiança. A probabilidade do intervalo aleatório conter a média da população é igual a $1 - \alpha$. Desta forma, esta pode ou não estar contida neste intervalo.

A probabilidade $1 - \alpha$ pode ser interpretada como o grau de confiança do intervalo aleatório conter a média.

Considere-se uma situação semelhante, mas para a qual a população é o conjunto de respostas possíveis a uma determinada questão, das quais apenas uma está correta. A resposta correta, denote-se por u_0 , é desconhecida. Para cada subconjunto crisp A extraído da população, pretendemos atribuir, questionando um perito ou partir de algum tipo de evidência, um valor $Q(A)$ com $Q(A) \in [0, 1]$, representante do grau de confiança com que se pode afirmar que u_0 está contido em A .

A modelação de conceitos difusos através de conjuntos difusos conduz à possibilidade de atribuir um significado matemático a afirmações construídas com uma linguagem natural [15].

Em termos clássicos, a relação entre dois elementos de dois conjuntos A e B caracteriza-se por outro conjunto, $A \times B$, com valores do grau de pertença $(\mu_{A \times B}(x, y))$ iguais a 0, quando x não tem relação com y , ou iguais 1, quando x tem relação com y .

Definição 2.3.4. Nas relações difusas, x relaciona-se com y com um grau de pertença pertencente ao intervalo $[0, 1]$. Assim a relação S , onde $S = A \times B$ representa outro conjunto difuso com uma função de pertença $\mu_S : A \times B \rightarrow [0, 1]$, sendo S definido por:

$$S = \{((x, y), \mu_S(x, y)) \mid \mu_S(x, y) \geq 0, x \in A, y \in B\}. \quad (2.28)$$

Nas relações difusas é permitido relacionar elementos de diferentes conjuntos por valores intermédios entre $[0, 1]$.

Definição 2.3.5. Sejam S e T duas relações definidas com base nos conjuntos difusos X, Y e Z , de forma que $S \subseteq X \times Y$ e $T \subseteq Y \times Z$, então a composição de S e T , representada por $S \bullet T$, é definida como:

$$\mu_{S \bullet T}(x, z) = \text{Máx} [\text{Min}(\mu_S(x, y), \mu_T(y, z))] \quad (2.29)$$

A composição $S \bullet T$ pode ser interpretada como uma indicação da relação existente entre os conjuntos X e Z .

As operações matemáticas de matrizes difusas têm um papel essencial na aplicação do método FAHP.

Definição 2.3.6. Uma matriz difusa de dimensão $m \times n$ é definida por $A = [< a_{ij}, a_{iju}>]_{m \times n}$, onde a_{iju} é o valor de pertença do elemento a_{ij} em A . Por uma questão de simplicidade, denote-se A como $A = [a_{iju}]$ [16].

Definição 2.3.7. Sejam X e Y duas matrizes difusas. Na adição de matrizes difusas podemos ter dois tipos de operações, $\max\{X, Y\}$ ou $\min\{X, Y\}$. Defina-se $X + Y = \max\{X, Y\}$.

Exemplo 2.3.4. Considere as matrizes difusas X e Y :

$$X = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 & 0.8 \\ 0.6 & 0.5 & 1.0 \\ 0.9 & 0.4 & 0.6 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.2 & 0.3 \\ 0.8 & 0.5 & 0.2 \\ 0.5 & 0.1 & 0.8 \end{bmatrix}$$

Pretendemos determinar a matriz resultante da adição das matrizes difusas X e Y .

$$X+Y = \max\{X, Y\} = \begin{bmatrix} \max(0.3, 1.0) & \max(0.7, 0.2) & \max(0.8, 0.3) \\ \max(0.6, 0.8) & \max(0.5, 0.5) & \max(1.0, 0.2) \\ \max(0.9, 0.5) & \max(0.4, 0.1) & \max(0.6, 0.8) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.7 & 0.8 \\ 0.8 & 0.5 & 1.0 \\ 0.9 & 0.4 & 0.8 \end{bmatrix}$$

Note-se que de forma análoga se pode obter o $\min\{X, Y\}$.

Ressalta-se que o resultado do produto usual de duas matrizes difusas não é uma matriz difusa. Desta forma, foi necessário definir uma operação compatível com o produto usual cujo resultado fosse uma matriz difusa. Podemos ter dois tipos de operações, a operação \max - \min e a operação \min - \max .

Definição 2.3.8. A operação \max - \min de duas matrizes é obtida semelhantemente à multiplicação usual de matrizes, porém, a operação produto é substituída pelo mínimo e a operação soma pelo máximo.

Na aplicação do método FAHP utilizamos a operação \max - \min que será representada pelo símbolo \bullet .

Exemplo 2.3.5. Considere-se o produto $X \bullet Y$ das matrizes referidas no exemplo anterior. Note que mesmo para este “novo” produto o número de colunas da matriz X tem de

ser igual ao número de linhas da matriz Y [4].

$$X = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 & 0.8 \\ 0.6 & 0.5 & 1.0 \\ 0.9 & 0.4 & 0.6 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.2 & 0.3 \\ 0.8 & 0.5 & 0.2 \\ 0.5 & 0.1 & 0.8 \end{bmatrix}$$

Pretendemos determinar a matriz resultante da produto das matrizes difusas X e Y . Para este exemplo considere a operação máx-min.

$$X \bullet Y = \text{máx}\{\min\{X, Y\}\} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$$

onde,

$$C_{11} = \text{máx}\{\min(0.3, 1.0), \min(0.7, 0.8), \min(0.8, 0.5)\} = \text{máx}\{0.3, 0.7, 0.5\} = 0.7;$$

$$C_{12} = \text{máx}\{\min(0.3, 0.2), \min(0.7, 0.5), \min(0.8, 0.1)\} = \text{máx}\{0.2, 0.5, 0.1\} = 0.5.$$

O processo de cálculo para a determinação dos restantes elementos de XY é análogo ao realizado para C_{11} e C_{12} , resultando a seguinte matriz difusa:

$$Y = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.5 & 0.8 \\ 0.6 & 0.5 & 0.8 \\ 0.9 & 0.4 & 0.6 \end{bmatrix}$$

Note-se que de forma análoga se pode obter a operação $\min\{\text{máx}\{X, Y\}\}$.

Com base nos conceitos referidos anteriormente podemos proceder à caracterização do **processo hierárquico analítico difuso**, o qual pode ser descrito em seis etapas fundamentais:

1. Definição do conjunto de avaliação dos fatores;
2. Especificação dos conjuntos de pesos associados a cada nível da hierarquia;
3. Implementação da avaliação dos peritos;
4. Determinação da matriz de avaliação;
5. Realização da avaliação abrangente;
6. Normalização dos resultados, de forma a ser possível estabelecer comparações.

Em primeiro lugar, definimos o conjunto relativo à classificação do grau de risco, repre-

sentado na equação (2.30)

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} \quad (2.30)$$

O conjunto V é geralmente constituído por quatro ou cinco elementos. Para efeitos da presente dissertação consideraremos cinco. Cada critério e subcritério será classificado com um dos cinco graus de risco: muito baixo (v_1), baixo (v_2), médio (v_3), alto (v_4) ou muito alto (v_5). O projeto inicia-se com a avaliação dos subcritérios, na qual cada perito atribui a cada subfator um grau de risco.

O grau de pertença de cada subfator C_j , relativamente ao elemento v_m no conjunto de avaliação, é representado por r_{jm} e calculado de acordo com a seguinte fórmula de pertença (2.31)

$$r_{jm} = \frac{M_{jm}}{N} \quad (2.31)$$

onde M_{jm} corresponde ao número de peritos que atribui o grau de risco v_m - pertencente ao conjunto de avaliação V - ao subfator C_j e N representa o número total de peritos participantes no estudo.

Nesta etapa salienta-se a importância dos questionários, uma vez que é através deles que cada perito avalia os subfatores C_j , atribuindo um grau de risco existente no conjunto V a cada subfator. Após o seu preenchimento, é realizada uma análise estatística sobre os resultados e aplicada a fórmula de pertença representada em (2.31).

Uma vez determinados os graus de pertença r_{jm} , estamos aptos a construir a matriz de avaliação difusa do conjunto de subcritérios associados ao fator B_i , R_i , que pode ser representada da seguinte forma:

$$R_i = \begin{matrix} & v_1 & v_2 & \dots & v_n \\ \begin{matrix} C_j \\ C_{j+1} \\ \vdots \\ C_{j+n} \end{matrix} & \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Segue-se o passo final do processo, a **Avaliação Difusa Abrangente**.

Na realização duma avaliação difusa abrangente, *fuzzy comprehensive evaluation*, adota-se um algoritmo de matemática difusa, baseado em operações do tipo *máx-min*.

Numa primeira fase realiza-se uma avaliação individual de risco. Trata-se duma avaliação

sob os indicadores de risco do primeiro nível da hierarquia.

Através do cálculo representado na equação (2.32), obtemos os vetores de avaliação difusa abrangente, representativos do grau de risco dos fatores do primeiro nível,

$$D_i = W_i \bullet R_i \quad (2.32)$$

onde W_i e R_i são, respetivamente, o vetor dos pesos do conjunto dos subcritérios e a matriz de avaliação do conjunto de subcritérios presentes no segundo nível e associados ao critério B_i . Ressalta-se que o operador \bullet encontra-se definido em 2.3.8. Após o cálculo de D_i é necessário proceder à normalização dos vetores, de forma a que possam ser estabelecidas comparações.

Através do cálculo dos vetores D_i , pode ser obtida a matriz de avaliação difusa dos critérios presentes no primeiro nível da hierarquia, R , correspondente à agregação dos vetores D_i devidamente ordenados. A matriz de avaliação difusa R pode ser representada por,

$$R = (D_1, D_2, \dots, D_n)^T. \quad (2.33)$$

O processo de avaliação difusa abrangente termina com o cálculo da matriz de avaliação final de risco D , representado em (2.34), onde W corresponde ao vetor dos pesos dos critérios presentes no primeiro nível da hierarquia.

$$D = W \bullet R \quad (2.34)$$

Analisando os valores de pertença do vetor D , determina-se qual é o seu elemento máximo e a que grau de risco corresponde no conjunto V . Relembra-se que o conjunto V é composto por cinco graus de risco: muito baixo (v_1), baixo (v_2), médio (v_3), alto (v_4) e muito alto (v_5). Supondo que o maior grau de pertença é o primeiro elemento do vetor D , então o nosso objeto de estudo apresentará o primeiro grau de risco presente no vetor V , grau de risco muito baixo.

No capítulo seguinte aplicaremos o processo hierárquico analítico difuso como modelo para caracterizar o risco nos gasodutos em ambiente urbano, de forma a determinar quais são os fatores que têm mais influência na ocorrência de incidentes nas tubagens da rede gás da EDP Gás Distribuição e qual o grau de risco associado a este rede.

Capítulo 3

Caso de Estudo

Neste capítulo acontece a aplicação do processo FAHP a um problema real e concreto. Posteriormente são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

3.1 Problema

O objetivo do projeto é caracterizar e aplicar um modelo matemático para o risco em gasodutos urbanos na EDP Gás Distribuição. Adaptou-se o processo hierárquico analítico difuso, como ferramenta de apoio à tomada de decisão multicritério, com base num modelo específico e explorado num artigo que pode ser consultado na referência [17]. O método FAHP encontra-se desenvolvido nas seções 2.2 e 2.3 do capítulo 2 e com a aplicação deste processo pretende-se avaliar o risco de incidentes na rede gás em ambiente urbano. Todos os passos contemplados na aplicação do método encontram-se evidenciados sequencialmente.

No processo AHP constrói-se uma estrutura hierárquica sob a qual se efetuam medições nos pares de elementos relativamente a um elemento de controlo, de forma a determinar os vetores dos pesos associados aos níveis da hierarquia. Os pesos são obtidos através da aplicação do método da média geométrica e são incorporados na estrutura para selecionar qual o critério de maior risco. Numa fase posterior realiza-se a avaliação difusa abrangente do risco.

3.1.1 Seleção dos participantes

Solicitou-se a participação de trinta e oito trabalhadores da direção técnica, mas por questões de confidencialidade não será mencionado o número de peritos participantes no estudo. Seja m o número de peritos que concordaram em participar. Elegeram-se a direção técnica uma vez que é a área responsável pela coordenação de todas as operações de gestão da manutenção, vigilância e intervenção na rede gás, estando diretamente relacionada com o problema em questão. Os restantes trabalhadores não participaram por questões de disponibilidade de tempo, uma vez que o preenchimento dos questionários requer algum tempo e sobretudo concentração.

Considera-se a existência de quatro grupos de peritos na direção técnica:

- Técnico operacional - Responsável pela execução de trabalhos na rede.
- Técnico de “backup” - Presta auxílio ao técnico operacional a partir do centro de exploração (Braga ou Porto - sede da EDP Gás Distribuição), podendo ou não ter o grau de licenciado na área.
- Técnico superior - Responsável pela coordenação e gestão de operações de manutenção, vigilância e intervenção. Requer no mínimo o grau de licenciatura na área.
- Técnico especialista - Executa as mesmas funções de um técnico superior mas num cargo de chefia. Requer no mínimo o grau de licenciatura na área.

Com o auxílio e supervisão do Engenheiro Ricardo Moreira foram selecionados, *a priori*, um conjunto de fatores e subfatores de risco para os gasodutos em ambiente urbano, para que através do preenchimento de um primeiro questionário, o grupo de peritos selecionado a participar no estudo, com base no seu conhecimento e experiência profissional, classificasse o grau de importância que esses fatores têm nos incidentes da rede gás. Além disso, foi-lhes pedida a indicação de outros fatores que considerassem pertinentes para o tema. Para que seja possível construir uma hierarquia sólida e coerente é essencial que a população alvo seja composta por trabalhadores com conhecimento e experiência no assunto, ou seja, peritos nos assuntos relacionados com a rede gás.

Após a análise do primeiro questionário e posterior modificação da hierarquia de fatores de risco, realizou-se um segundo questionário, de forma a que os peritos classifiquem quantitativamente um critério relativamente a outro, com um valor que representa o quão o fator escolhido é mais importante que o outro. Numa segunda fase, os peritos atribuíram

um nível de risco a cada subfator presente no segundo nível da hierarquia.

Por questões de confidencialidade os questionários realizados assim como as respectivas análises gráficas foram unicamente incluídos no manual produzido para a EDP Gás Distribuição. Alguns dos gráficos, não identificativos, provenientes da análise dos resultados do segundo questionário podem ser consultados no anexo A.

3.1.2 Estrutura hierárquica dos fatores de risco dos gasodutos urbanos

De acordo com o conhecimento e experiência dos peritos consultados, o risco nos gasodutos urbanos reflete-se em essencialmente cinco fatores e dezanove subfatores, distribuídos pelos cinco fatores mencionados.

1. Intervenção indevida por entidades terceiras ou intervenções executadas incorretamente (inclui entidades internas e prestadores de serviço externos)

No que diz respeito a intervenções na rede destacam-se as operações executadas incorretamente por parte da exploração e manutenção (entidades internas da EDP Gás Distribuição) e intervenções indevidas por entidades terceiras englobando fraudes e roubos. Além disso, o aumento do número de intervenções por parte de entidades externas nas proximidades das infraestruturas da instituição também tem impacto no risco, assim como a ausência de cadastro em obras por entidades terceiras. O estado dos equipamentos (PRM, CCG, entre outros) também pode ser incorporado nesta secção.

2. Corrosão nas tubagens

A corrosão só é considerada nas tubagens de aço. As tubagens em polietileno não são suscetíveis à corrosão. Neste fator destaca-se a corrosão no interior e no exterior das tubagens.

3. Fatores de projeto

Existem fatores de risco relacionados com as características da rede. O material utilizado nas tubagens: aço, cobre ou polietileno é um desses fatores de risco. Além disso, é necessário considerar que a quantidade de novas interligações (ramais isolados e derivações de redes) após colocação em serviço, a quantidade de válvulas de rede e a existência de válvulas em todos os ramais também são subfatores que se inserem nesta secção. Considera-se também a aquisição de redes existentes a terceiros, uma

vez que quando são adquiridas desta forma já têm as suas características definidas e estas podem não ser alteráveis.

4. Localização de redes

Destacam-se três localizações de redes: baías de estacionamento, passeios e locais propensos a vegetação de grande porte. Efetivamente cada local tem um risco diferente associado.

5. Fatores Geológicos

Na realidade os fatores de risco geológicos não são controláveis pelo ser humano, como é o caso dos movimentos de terra, cheias e fenómenos climáticos extremos. Contudo, podem ser criadas e tomadas medidas que permitem reduzir as consequências da ocorrência destes fenómenos.

Com base na decorrente análise foi criada uma estrutura hierarquia dividida em três níveis: nível 0, nível 1 e nível 2. O nível 0 é constituído pelo objetivo do estudo, o nível 1 por cinco fatores de risco e o nível 2 por dezanove subfatores de risco. A estrutura hierárquica resultante da análise encontra-se ilustrada na figura 3.1.

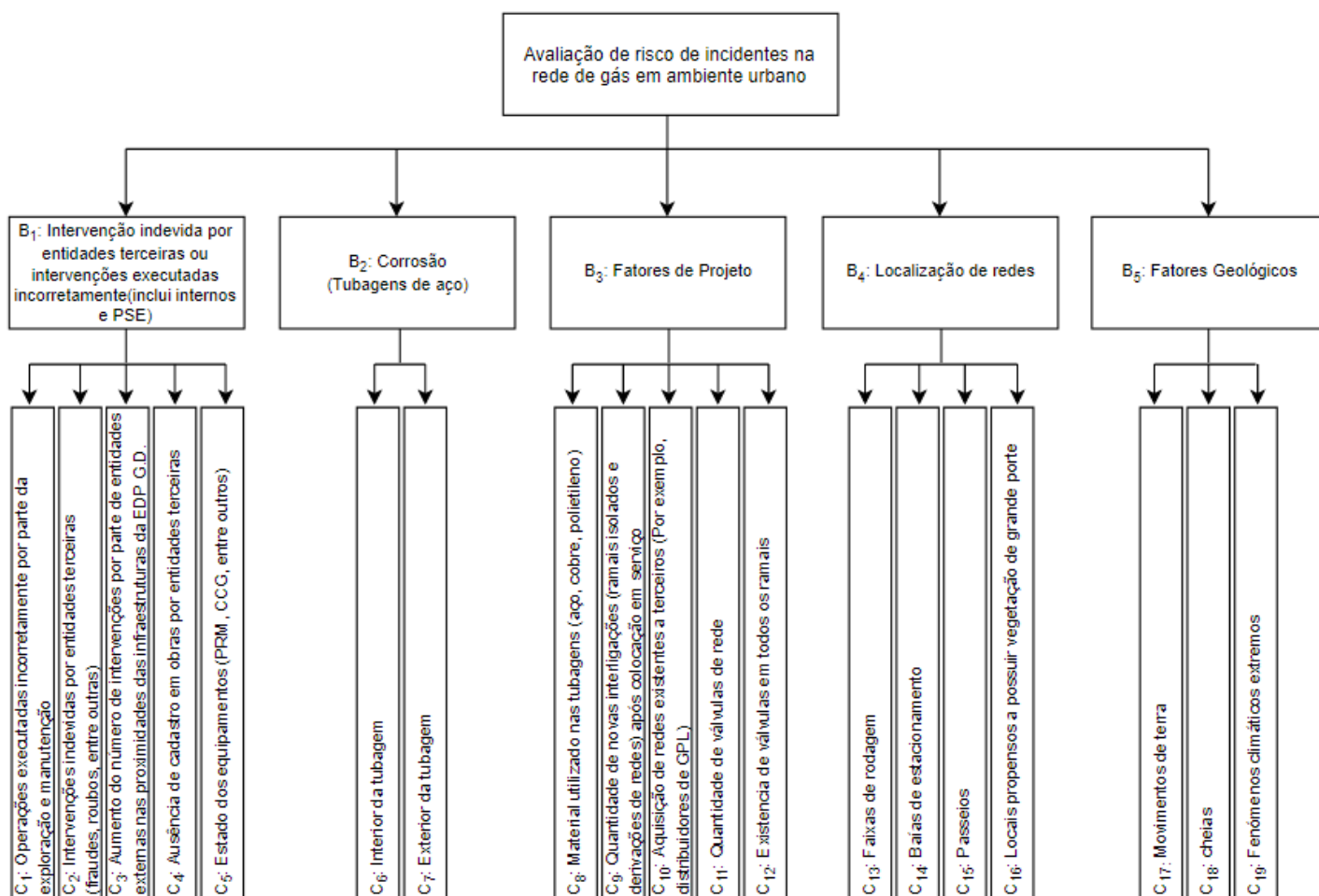


Figura 3.1: Estrutura hierárquica do conjunto dos fatores de risco

O próximo passo é a construção das matrizes de comparação, com base nas classificações atribuídas pelos decisores às comparações emparelhadas. Foi pedido aos peritos, através do preenchimento de um segundo questionário, que comparassem cada dois fatores presentes no primeiro nível da estrutura hierárquica, de forma a identificar o fator mais importante entre cada dois e a classificar essa importância para o objetivo de decisão. Para efeitos de classificação utilizou-se a escala de Saaty (tabela 2.1).

De forma análoga, cada perito identificou qual o subfator mais importante no segundo nível da hierarquia e classificou essa importância de acordo com o contributo que esses subfatores têm para o fator ao qual estão associados.

3.1.3 Cálculo do Vetor dos Pesos e Teste de Consistência

Após a construção das matrizes de comparação, para cada um dos peritos calcularam-se os vetores dos pesos associados a cada nível da hierarquia, utilizando o método da média geométrica enunciado no capítulo 2.2. O próximo passo é a aplicação dos testes de consistência:

1. Cálculo do maior valor próprio da matriz de comparação,

$$\lambda_{máx} = \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{nw_i} \quad (3.1)$$

2. Cálculo do índice de consistência (CI),

$$CI = \frac{\lambda_{máx} - n}{n - 1} \quad (3.2)$$

3. Cálculo do rácio de consistência (CR),

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.3)$$

Um grande número das matrizes de comparação obtidas apresenta valores para o rácio de consistência superiores a 0.1. Como já foi referido no capítulo 2.2, o rácio de consistência apresenta valores aceitáveis caso seja inferior a 0.1 e toleráveis caso esteja compreendido entre 0.1 e 0.2.

Uma vez que um rácio de consistência de 0.2 é tolerável, foi averiguada a possibilidade da existência de diferenças relevantes caso este fosse o valor limite de CR. Embora se tenha suavizado o critério de consistência, um grande número das matrizes permaneceu inconsistente, pelo que deveria ser pedido aos peritos que verificassem se ocorreu algum engano no preenchimento dos questionários ou até que revissem as suas respostas. Tendo em consideração que a sua revisão seria um processo demorado e que, caso se desconsiderassem as respostas inconsistentes o número de respostas para análise seria muito reduzido, propõe-se a utilização da matriz de comparações agregada, com o propósito de expôr o desencadeamento e a aplicação do processo hierárquico analítico difuso.

A agregação das avaliações individuais dos peritos é obtida através da aplicação do método da média geométrica ponderada, (*WGMM*), enunciado no capítulo 2.2. Os elementos das

matrizes resultantes são decimais, pelo que temos de utilizar o inteiro mais próximo correspondente [14], obtendo assim inteiros entre 1 e 9 que estão de acordo com a escala de Saaty. Posteriormente, utilizando a média geométrica, calculam-se os vetores dos pesos associados a cada matriz de comparação.

Seguem-se os resultados da agregação das matrizes individuais de avaliação, assim como os pesos, os valores de CI, RI, CR e do λ_{max} associados.

A matriz de comparação dos critérios, presentes no primeiro nível da hierarquia, tem dimensão 5×5 pelo que $RI = 1.12$ (o valor de RI utilizado pode ser consultado na tabela 2.2.)

	B₁	B₂	B₃	B₄	B₅	<i>Pesos</i>
B₁	1	7	5	3	5	0.5229
B₂	$\frac{1}{7}$	1	1	$\frac{1}{3}$	2	0.0934
B₃	$\frac{1}{5}$	1	1	1	2	0.1244
B₄	$\frac{1}{3}$	3	1	1	4	0.1972
B₅	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	1	0.0622

Tabela 3.1: Matriz de comparação dos critérios relativamente ao objetivo de decisão

Seguem-se os resultados do teste de consistência.

$$W = (0.5229, 0.0934, 0.1244, 0.1972, 0.0622)$$

$$\lambda_{max} = 5.1864$$

$$CI = 0.0466$$

$$CR = 0.0416 < 0.1$$

A matriz de comparação dos subcritérios relativos às intervenções indevidas por entidades terceiras ou executadas incorretamente (inclui internos e PSE) tem dimensão 5×5 , então $RI = 1.12$.

	C₁	C₂	C₃	C₄	C₅	<i>Pesos</i>
C₁	1	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	1	0.0613
C₂	5	1	$\frac{1}{2}$	1	3	0.2305
C₃	5	2	1	2	6	0.4013
C₄	4	1	$\frac{1}{2}$	1	5	0.2442
C₅	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	1	0.0626

Tabela 3.2: Matriz de comparação para os subcritérios relativos às intervenções indevidas por entidades terceiras ou executadas incorretamente (inclui internos e PSE)

Seguem-se os resultados do teste de consistência.

$$W_1 = (0.0613, 0.2305, 0.4013, 0.2442, 0.0626)$$

$$\lambda_{\max} = 5.0650$$

$$CI = 0.0163$$

$$CR = 0.0145 < 0.1$$

Existem apenas dois subcritérios do critério corrosão, pelo que a matriz de comparação resultante é claramente consistente.

	C₆	C₇	<i>Pesos</i>
C₆	1	1	0.5000
C₇	1	1	0.5000

Tabela 3.3: Matriz de comparação para os subcritérios relativos à corrosão

$$W_2 = (0.5000, 0.5000)$$

$$\lambda_{\max} = 2$$

$$CR = 0$$

A matriz de comparação dos subcritérios relativos aos fatores de projeto tem dimensão 5×5 então $RI = 1.12$.

	C₈	C₉	C₁₀	C₁₁	C₁₂	<i>Pesos</i>
C₈	1	1	$\frac{1}{2}$	2	1	0.1904
C₉	1	1	1	2	2	0.2512
C₁₀	2	1	1	2	2	0.2886
C₁₁	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1	0.1256
C₁₂	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1	0.1443

Tabela 3.4: Matriz de comparação para os subcritérios relativos aos fatores de projeto

Seguem-se os resultados do teste de consistência.

$$W_3 = (0.1904, 0.2512, 0.2886, 0.1256, 0.1443)$$

$$\lambda_{máx} = 5.0773$$

$$CI = 0.0193$$

$$CR = 0.0173 < 0.1$$

A matriz de comparação dos subcritérios relativos à localização de redes tem dimensão 4×4 pelo que $RI = 0.9$.

	C₁₃	C₁₄	C₁₅	C₁₆	<i>Pesos</i>
C₁₃	1	2	2	1	0.3221
C₁₄	$\frac{1}{2}$	1	1	$\frac{1}{2}$	0.1850
C₁₅	$\frac{1}{2}$	1	1	1	0.2125
C₁₆	1	2	1	1	0.2804

Tabela 3.5: Matriz de comparação para os subcritérios relativos à localização de redes

Seguem-se os resultados do teste de consistência.

$$W_4 = (0.3221, 0.1850, 0.2125, 0.2804)$$

$$\lambda_{máx} = 4.0725$$

$$CI = 0.0242$$

$$CR = 0.0268 < 0.1$$

A matriz de comparação dos subcritérios relativos aos fatores geológicos tem dimensão 3×3 então $RI = 0.58$.

	C₁₇	C₁₈	C₁₉	<i>Pesos</i>
C₁₇	1	4	4	0.5346
C₁₈	$\frac{1}{4}$	1	1	0.2327
C₁₉	$\frac{1}{4}$	1	1	0.2327

Tabela 3.6: Matriz de comparação para os subcritérios relativos aos fatores geológicos

Seguem-se os resultados do teste de consistência.

$$W_5 = (0.5346, 0.2327, 0.2327)$$

$$\lambda_{max} = 3.2103$$

$$CI = 0.1052$$

$$CR = 0.1813 > 0.1$$

A matriz de comparação dos critérios relativamente ao objetivo de decisão, assim como as matrizes de comparação para os subcritérios relativos a um determinado critério, apresentam um rácio de consistência inferior a 0.1, com a exceção da matriz de comparação para os subcritérios relativos aos fatores geológicos. Contudo, o rácio de consistência dessa matriz é inferior a 0.2, pelo que é tolerável. Portanto, as matrizes verificaram o teste de consistência.

Atente-se que os vetores dos pesos referidos encontram-se na forma normalizada.

Em forma de resumo, o esquema 3.2 traduz o fluxo da aplicação do método AHP no caso de estudo em questão.

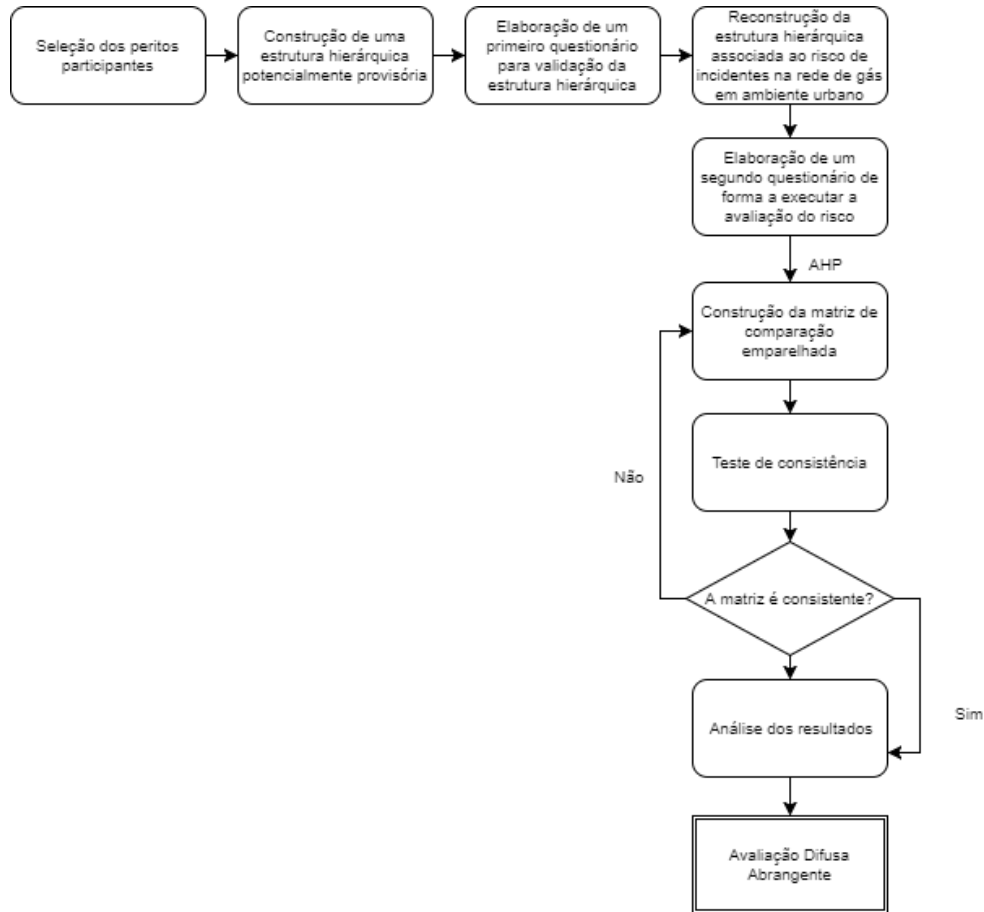


Figura 3.2: Fluxo da aplicação do método AHP

A próxima fase é a **avaliação difusa abrangente**, *fuzzy comprehensive evaluation*, para a qual é adotado um algoritmo de matemática difusa, baseado em operações do tipo *máx-min*, enunciadas no capítulo 2.3.

Construção da matriz de avaliação difusa

Em primeiro lugar, define-se o conjunto dos graus de avaliação, V .

$$V = \{Muito\ alto, Alto, Médio, Baixo, Muito\ baixo\} \quad (3.4)$$

No questionário enviado aos peritos, cada um, atribuiu um grau de risco presente no conjunto V a cada subfator de risco.

Uma vez analisadas as respostas procedeu-se ao cálculo do grau de pertença, através da aplicação da fórmula de pertença mencionada no capítulo 2.3. Relembre-se a fórmula de pertença,

$$r_{jm} = \frac{M_{jm}}{N} \quad (3.5)$$

onde M_{jm} corresponde ao número de peritos que atribui o grau de risco v_m ao fator C_j e N representa o número total de peritos que participa no estudo.

Uma vez determinados os graus de pertença r_{jm} , segue-se a construção das matrizes de avaliação difusa R_1, R_2, R_3, R_4 e R_5 .

R_1	Muito alto	Alto	Médio	Baixo	Muito baixo
C_1	0.15	0.35	0.12	0.27	0.12
C_2	0.00	0.04	0.15	0.42	0.38
C_3	0.00	0.04	0.15	0.54	0.27
C_4	0.00	0.08	0.15	0.31	0.46
C_5	0.15	0.38	0.27	0.15	0.04

Tabela 3.7: Matriz de avaliação difusa dos subcritérios relativos às intervenções indevidas por entidades terceiras ou executadas incorretamente (inclui internos e PSE)

Relembre-se que o vetor dos pesos associados a este conjunto de subcritérios é o seguinte $W_1 = (0.0613, 0.2305, 0.4013, 0.2442, 0.0626)$.

R_2	Muito alto	Alto	Médio	Baixo	Muito baixo
C_6	0.23	0.23	0.23	0.23	0.08
C_7	0.12	0.35	0.31	0.12	0.12

Tabela 3.8: Matriz de avaliação difusa dos subcritérios relativos à corrosão nas tubagens

Relembre-se que o vetor dos pesos associados a este conjunto de subcritérios é o seguinte $W_2 = (0.5000, 0.5000)$.

R_3	Muito alto	Alto	Médio	Baixo	Muito baixo
C_8	0.15	0.23	0.46	0.12	0.04
C_9	0.08	0.35	0.35	0.19	0.04
C_{10}	0.04	0.08	0.50	0.31	0.08
C_{11}	0.08	0.31	0.31	0.23	0.08
C_{12}	0.08	0.27	0.35	0.15	0.15

Tabela 3.9: Matriz de avaliação difusa dos subcritérios relativos aos fatores de projeto

Relembre-se que o vetor dos pesos associados a este conjunto de subcritérios é o seguinte $W_3 = (0.1904, 0.2512, 0.2886, 0.1256, 0.1443)$.

R_3	Muito alto	Alto	Médio	Baixo	Muito baixo
C_{13}	0.12	0.15	0.35	0.23	0.15
C_{14}	0.12	0.27	0.35	0.23	0.04
C_{15}	0.12	0.46	0.23	0.08	0.12
C_{16}	0.04	0.27	0.23	0.27	0.19

Tabela 3.10: Matriz de avaliação difusa dos subcritérios relativos à localização de redes

Relembre-se que o vetor dos pesos associados a este conjunto de subcritérios é o seguinte $W_4 = (0.3221, 0.1850, 0.2125, 0.2804)$.

R_5	Muito alto	Alto	Médio	Baixo	Muito baixo
C_{17}	0.12	0.12	0.42	0.23	0.12
C_{18}	0.19	0.38	0.15	0.23	0.04
C_{19}	0.23	0.38	0.19	0.12	0.08

Tabela 3.11: Matriz de avaliação difusa dos subcritérios relativos aos fatores geológicos

Relembre-se que o vetor dos pesos associados a este conjunto de subcritérios é o seguinte $W_5 = (0.5346, 0.2327, 0.2327)$.

Avaliação individual de risco

Numa primeira fase realiza-se a avaliação individual de risco. Trata-se duma avaliação sob os indicadores de risco do primeiro nível da hierarquia. Com esta avaliação pretendemos identificar qual o subfator com maior risco associado a cada um dos fatores.

Designemos por D_1, D_2, D_3, D_4 e D_5 os vetores resultantes da avaliação individual de risco normalizados dos cinco fatores identificados, respetivamente.

$$D_1 = W_1 \bullet R_1 = (0.0650, 0.0798, 0.1596, 0.4163, 0.2793)$$

$$D_2 = W_2 \bullet R_2 = (0.1875, 0.2813, 0.2500, 0.1875, 0.0938)$$

$$D_3 = W_3 \bullet R_3 = (0.1366, 0.2230, 0.2562, 0.2562, 0.1281)$$

$$D_4 = W_4 \bullet R_4 = (0.0988, 0.2305, 0.2757, 0.2305, 0.1646)$$

$$D_5 = W_5 \bullet R_5 = (0.1872, 0.1888, 0.3432, 0.1872, 0.0936)$$

onde o operador \bullet foi definido no capítulo 2 em 2.3.8, representando uma operação do tipo *máx-min*.

Observe-se que para caracterizar o risco do fator B_i , identifica-se o grau de risco, pertencente ao conjunto V , correspondente ao maior valor de pertença no vetor D_i , $i=1, 2, 3, 4, 5$. O valor máximo de pertença no vetor D_1 é 0.4163, levando a que o fator “intervenção indevida por entidades terceiras ou intervenções executadas incorretamente (inclui PSE e internos)” seja classificado como um fator de baixo risco. No caso do vetor D_2 o valor máximo de pertença é 0.2813, traduzindo-se na classificação do fator “corrosão” como um fator de alto risco. Os vetores D_3, D_4 e D_5 relativos aos “fatores de projeto”, “localização de redes” e “fenómenos geológicos”, são classificados como fatores de médio-baixo, médio e médio risco, respetivamente.

Avaliação difusa abrangente de risco

Nesta fase decorre a construção da matriz de avaliação difusa R , do primeiro nível, que

consiste na agregação dos vetores D_1, D_2, D_3, D_4 e D_5 ,

$$R = (D_1, D_2, D_3, D_4, D_5)^T = \begin{pmatrix} 0.0650 & 0.0798 & 0.1596 & 0.4163 & 0.2793 \\ 0.1875 & 0.2813 & 0.2500 & 0.1875 & 0.0938 \\ 0.1366 & 0.2230 & 0.2562 & 0.2562 & 0.1281 \\ 0.0988 & 0.2305 & 0.2757 & 0.2305 & 0.1646 \\ 0.1872 & 0.1888 & 0.3432 & 0.1872 & 0.0936 \end{pmatrix}$$

A fase final do processo de avaliação difusa abrangente corresponde ao cálculo do vetor D . Relembre-se que o vetor dos pesos W associado ao primeiro nível da hierarquia é dado por $W = (0.5229, 0.0934, 0.1244, 0.1972, 0.0622)$.

$$D = W \bullet R = (0.1024, 0.1624, 0.1624, 0.3429, 0.2300)$$

Realizando uma análise análoga à executada na avaliação individual dos fatores de risco, determina-se que o valor máximo de pertença do vetor D é 0.3429, o que se traduz numa avaliação de risco baixa, do risco de incidentes na rede gás em ambiente urbano.

3.2 Discussão dos Resultados

A avaliação dos fatores de risco do primeiro nível da hierarquia relativamente ao risco de incidentes na rede de gás em ambiente urbano, resultou um peso 41.6% associado a um baixo risco.

Consultando a tabela 3.1 relativa à matriz de avaliação do primeiro nível, observa-se que o fator relativo à “intervenção indevida por entidades terceiras ou intervenções executadas incorretamente (inclui internos e PSE)” tem um peso de 52.3%. Recorrendo à tabela 3.2 deduzimos que o subfator que tem um maior risco associado a este fator é o “aumento do número de intervenções por parte de entidades externas nas proximidades das infraestruturas da EDP Gás Distribuição”.

O fator referente à localização de redes é o segundo fator com maior peso, 19.7%, para o qual, a localização de redes em faixas de rodagem é o subfator de maior risco.

Seguem-se os fatores de projeto, com um peso de 12% e com o subfator relativo à aquisição de redes existentes a terceiros (por exemplo distribuidores de GPL) como subfator de maior impacto.

A corrosão nas tubagens de aço tem um peso de 9.3% e os seus subfatores são caracterizados de forma idêntica em termos de risco.

Por último, o fator com menor peso associado, os fatores geológicos, com cerca de 6.2% e com o subfator movimentos de terra como o que tem um maior risco associado a este fator.

Relembre-se que, embora as matrizes de comparações agregadas sejam consistentes e englobem as opiniões dos peritos enquanto grupo, estas foram construídas com base num grande número de matrizes inconsistentes.

Na análise a que se procedeu, observou-se a existência de alguma diversidade de respostas. Desta forma, ao invés de ter sido considerado um único grupo de peritos, poder-se-ia ter estudado a natureza e a aproximação das respostas dadas de acordo com o grupo de técnicos. Seria uma vertente importante de explorar, na medida em que a natureza da respostas contribui para a qualidade do objetivo de decisão que no presente estudo corresponde à avaliação de risco de incidentes na rede gás em ambiente urbano.

3.3 Considerações Finais

O processo hierárquico analítico possibilita a combinação de componentes quantitativas e qualitativas, permitindo incorporar na mesma estrutura fatores de naturezas diferentes. Trata-se de um método simples, flexível e que permite a decomposição de problemas complexos em subproblemas mais fáceis de manipular. Ao realizar uma avaliação abrangente difusa é possível caracterizar o risco individual dos fatores e o risco global do objetivo. Todavia, apesar de ser um método bastante vantajoso possui limitações. Salientam-se algumas das limitações associadas a este método:

- As matrizes de comparação têm de ser recíprocas positivas;
- A atribuição do grau de importância na comparação de dois fatores pode ser confusa e complicada, devido à amplitude da escala e proximidade das interpretações associadas a cada valor;
- Trata-se de um procedimento que requer tempo, dedicação e muita concentração para que se possam obter resultados viáveis.

Além disso, não é possível determinar em que medida é que as respostas dos peritos são influenciadas pelo seu conhecimento. Ou seja, será que os peritos conseguem separar a sua opinião pessoal da opinião baseada puramente na sua experiência profissional?

O índice de consistência é crucial no processo de decisão. Além de indicar se as respostas dos peritos são coerentes, enquanto o rácio de consistência não for satisfatório, deve-se considerar uma segunda etapa para revisão das respostas dos questionários.

Embora as limitações de tempo não tenham permitido uma segunda fase de revisão, as matrizes agregadas consideradas parecem adequadas ao problema em estudo.

Bibliografia

- [1] Ahmed J., Siyal M., Najam S. e Najam Z. *Fuzzy Logic Based Power-Efficient Real-Time Multi-Core System*. Springer, 2017.
- [2] Brunelli, Matteo. *Introduction to the analytic hierarchy process*. Springer, 2014.
- [3] Davvodi, A. “On inconsistency of a pairwise comparison matrix.” *International Journal of Industrial Mathematics* 1.4 (2009): 343-350.
- [4] Geethalakshmi, M., N. Jose Praveena, and A. Rajkumar. “Result Analysis of students using fuzzy matrices.” *International Journal of Scientific and Research Publications* 2.4 (2012).
- [5] Guo, Boyan, and Ali Ghalambor. *Natural gas engineering handbook*. Elsevier, 2014.
- [6] Ho, William. “Integrated analytic hierarchy process and its applications—A literature review.” *European Journal of operational research* 186.1 (2008): 211-228.
- [7] Hummel, J. Marjan, John FP Bridges, and Maarten J. IJzerman. “Group decision making with the analytic hierarchy process in benefit-risk assessment: a tutorial.” *The Patient-Patient-Centered Outcomes Research* 7.2 (2014): 129-140.
- [8] Lee, Sangwook. “Application of AHP and Fuzzy AHP to Decision-Making Problems in Construction.” (2016)
- [9] Lotfi, Elaachak & Belahbib, Amine & Bouhorma, Mohammed. Application of Analytic Hierarchical Process Method for Video Game Genre Selection. *International Journal of Computer Applications* 96. (2014)
- [10] Lu, Ying. “Supply Chain Risk Assessment Based on AHP and Fuzzy Comprehensive Assessment Mode: A Case Study of the Chemical Supply Chain.”

- [11] International Journal of u and e-Service, Science, and Technology 8.2 (2015): 227-234.
- [12] Macharia, Peter M., Charles N. Mundia, and Miriam W. Wathuo. "Experts' Responses Comparison in a GIS-AHP Oil Pipeline Route Optimization: A Statistical Approach." *American Journal of Geographic Information System* 4.2 (2015): 53-63.
- [13] Majumder, Mrinmoy. *Impact of urbanization on water shortage in face of climatic aberrations*. Springer, 2015.
- [14] Mu H. and Pereyra-Rojas M. *Practical Decision Making. An Introduction to the Analytic Hierarchy Process (AHP) Using Super Decisions v2*. Springer, 2017.
- [15] Nguyen, Hung T., and Elbert A. Walker. *A first course in fuzzy logic*. CRC press, 2000.
- [16] Pal, Madhumangal. "Fuzzy Matrix and its Application".(2016)
- [17] Peibin, G. O. N. G., et al. "Fuzzy comprehensive evaluation in well control risk assessment based on AHP: A case study." *Advances in Petroleum Exploration and Development* 4.1 (2012): 13-18.
- [18] Saaty, Thomas L. "Decision making with the analytic hierarchy process." *International journal of services sciences* 1.1 (2008): 83-98.
- [19] Saaty, Thomas L. "How to make a decision: the analytic hierarchy process." *European journal of operational research* 48.1 (1990): 9-26.
- [20] Wolkenhauer, Olaf. *Data engineering: fuzzy mathematics in systems theory and data analysis*. John Wiley & Sons, 2004.
- [21] Xu, Z. "On consistency of the weighted geometric mean complex judgement matrix in AHP." *European Journal of Operational Research* 126.3 (2000): 683-687.
- [22] Yager, Ronald R., and Dimitar P. Filev. "Essentials of fuzzy modeling and control." *New York* 388 (1994).
- [23] You, Qiuju, et al. "Risk Assessment of Urban Gas Pipeline Network Based on Fuzzy Multi-attribute Method." *Journal of Applied Sciences* 14 (2014): 955-959.

- [24] Zadnik-Stirn, Lidija, and Petra Grošelj. “Multiple criteria methods with focus on analytic hierarchy process and group decision making.” *Croatian Operational Research Review* 1.1 (2010): 2-11.
- [25] Hazards Intelligence. (2005). *Gas Pipeline Explosion at Ghislenghien, Belgium*. Acedido em 20 de Setembro de 2017, em: <https://web.archive.org/web/20110724154332/http://www.iab-atex.nl/publicaties/database/Ghislenghien%20Dossier.pdf>.
- [26] BONNER R. e SUHARTONOOCT M. (2006). *Indonesia gas blast linked to volcanic mud - Asia - Pacific - International Herald Tribune*. Acedido em 20 de Setembro de 2017, em: <http://www.nytimes.com/2006/11/23/world/asia/23iht-blast.3642098.html>.
- [27] EDP Gás Distribuição. (2013). Acedido em 20 de Setembro de 2017, em: <http://www.edpgasdistribuicao.pt/>
- [28] Gollom M. (2014). *Pipeline rupture: Alberta resident unaware of 2009 blast Woman living near pipeline angered she wasn't told of the pipeline explosion*. Acedido em 20 de Setembro de 2017, em: <http://www.cbc.ca/news/pipeline-rupture-alberta-resident-unaware-of-2009-blast-1.2525030>
- [29] (2014). *TransCanada pipeline explosion Keystone XL company's natural-gas pipeline explodes, burns in Manitoba, Canada*. Acedido em 20 de Setembro de 2017, em: <http://www.newsreview.com/chico/transcanada-pipeline-explosion/content?oid=12685546>

Apêndice A

Segundo Questionário

Gráficos correspondentes

Gráficos alusivos à adesão ao estudo, às habilitações e anos de experiência dos peritos.

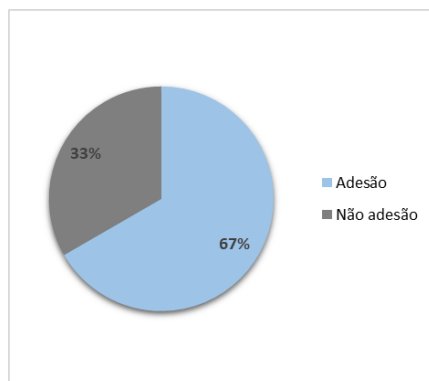


Figura A.1: Peritos participantes no estudo

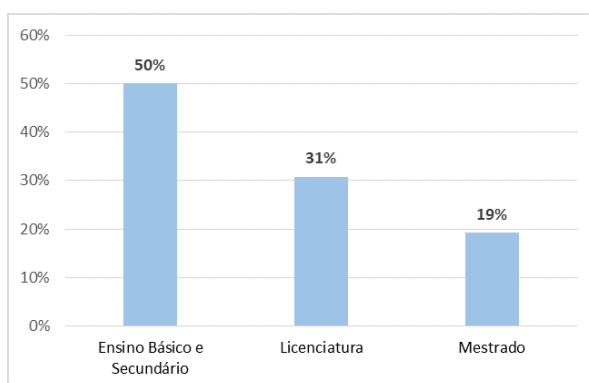


Figura A.2: Habilitações dos peritos na forma agregada

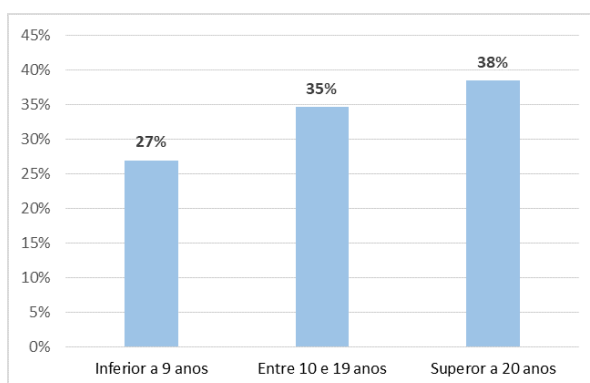
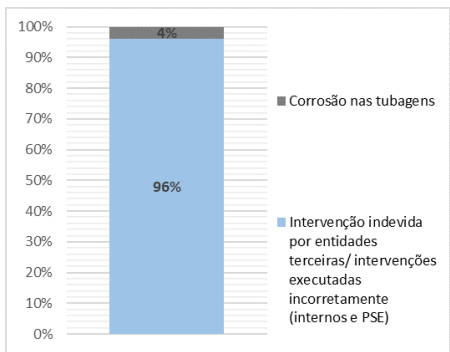
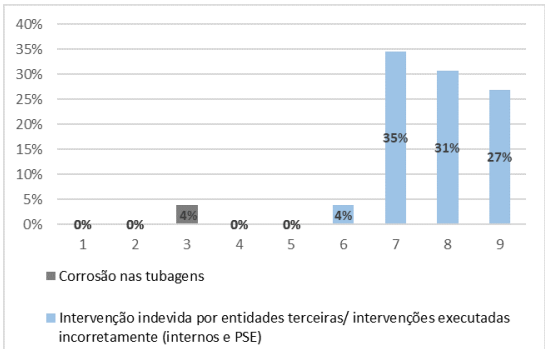


Figura A.3: Anos de experiência dos peritos

Comparação dos critérios presentes no primeiro nível da hierarquia

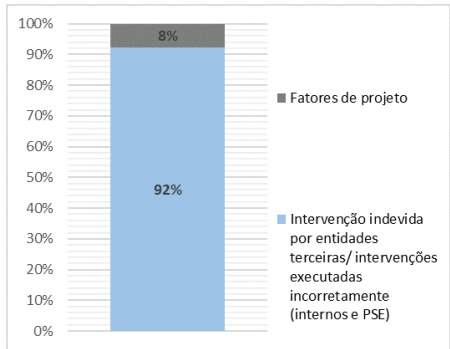


(a) Seleção do fator de risco mais importante

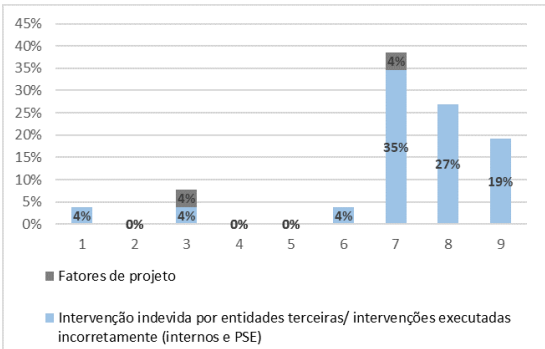


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.4: Comparação dos fatores: intervenção indevida por entidades terceiras/intervenções executadas incorretamente (internos e PSE) e corrosão nas tubagens

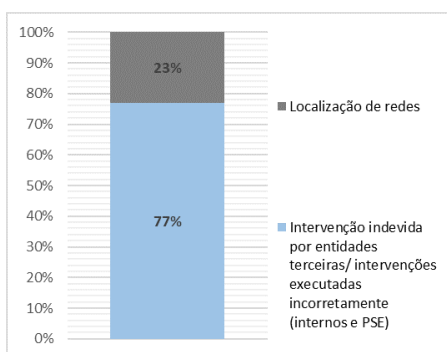


(a) Seleção do fator de risco mais importante

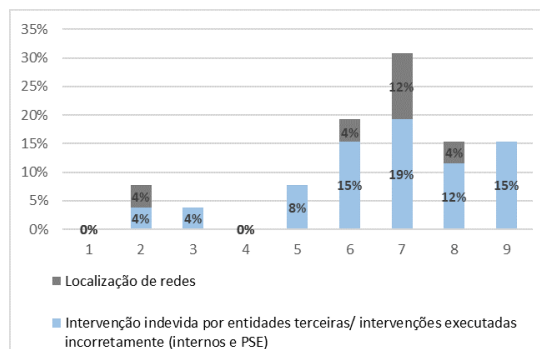


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.5: Comparação dos fatores: intervenção indevida por entidades terceiras/intervenções executadas incorretamente (internos e PSE) e fatores de projeto

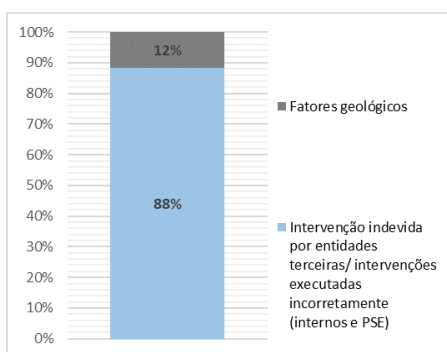


(a) Seleção do fator de risco mais importante

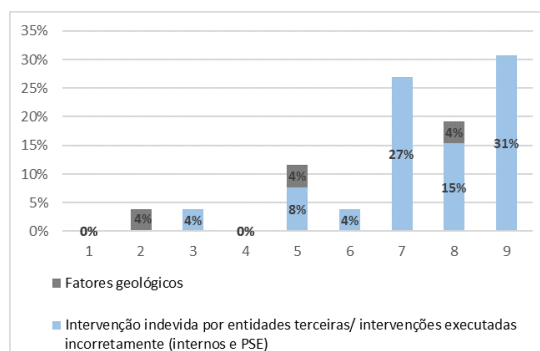


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.6: Comparação dos fatores: intervenção indevida por entidades terceiras/intervenções executadas incorretamente (internos e PSE) e localização de redes

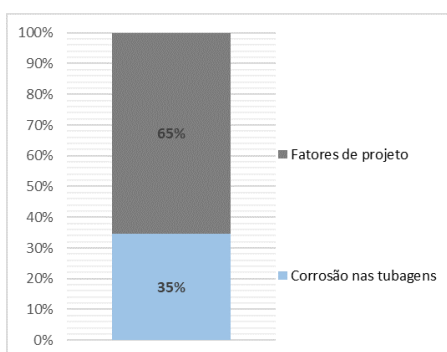


(a) Seleção do fator de risco mais importante

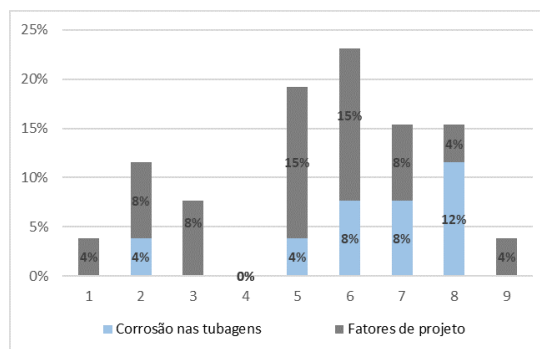


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.7: Comparação dos fatores: intervenção indevida por entidades terceiras/intervenções executadas incorretamente (internos e PSE) e fatores geológicos

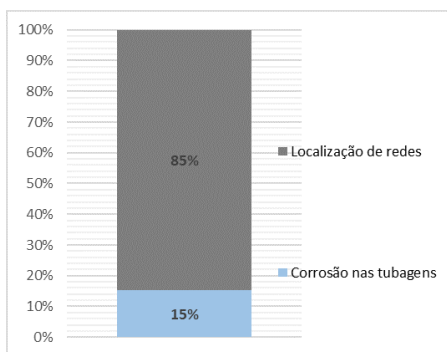


(a) Seleção do fator de risco mais importante

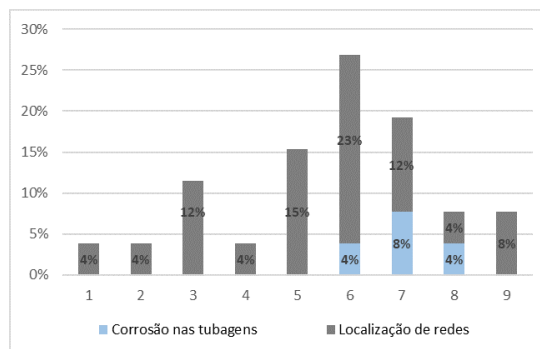


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.8: Comparação dos fatores: corrosão nas tubagens e fatores de projeto

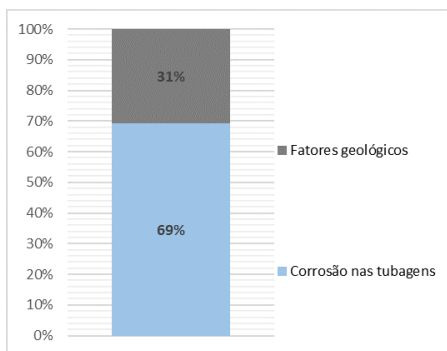


(a) Seleção do fator de risco mais importante

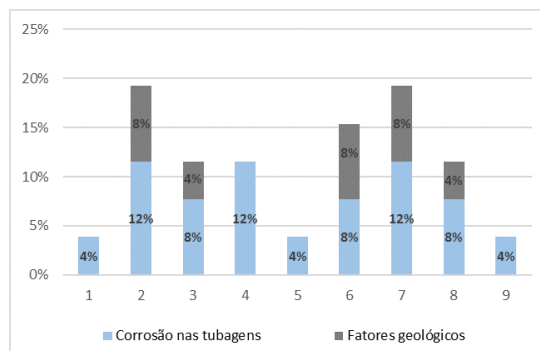


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.9: Comparação dos fatores: corrosão nas tubagens e localização de redes

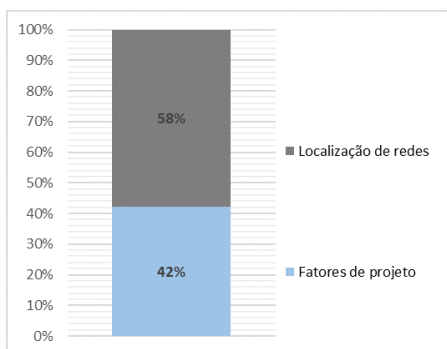


(a) Seleção do fator de risco mais importante

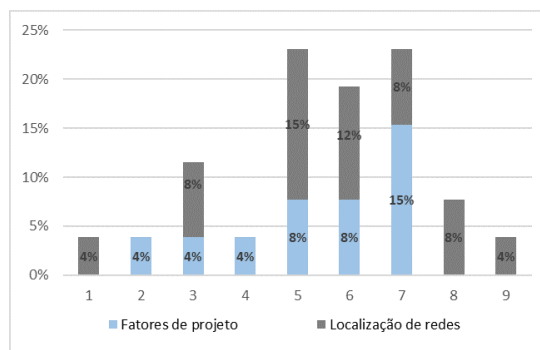


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.10: Comparação dos fatores: corrosão nas tubagens e fatores geológicos

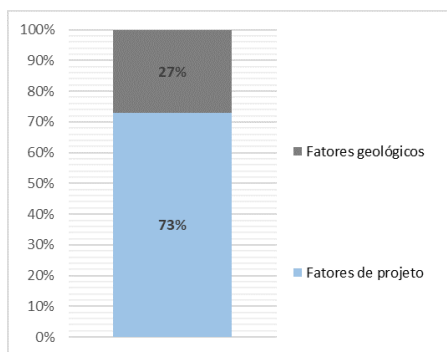


(a) Seleção do fator de risco mais importante

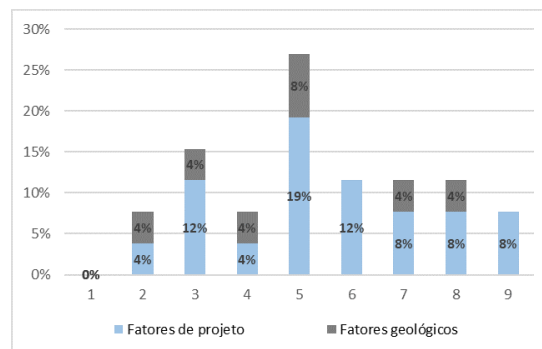


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.11: Comparação dos fatores: fatores de projeto e localização de redes

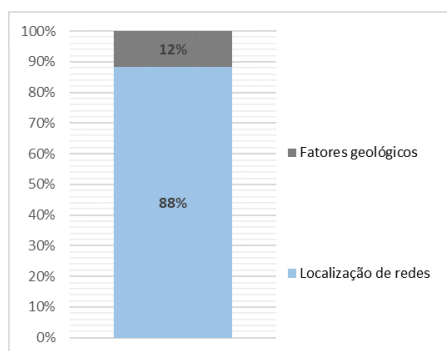


(a) Seleção do fator de risco mais importante

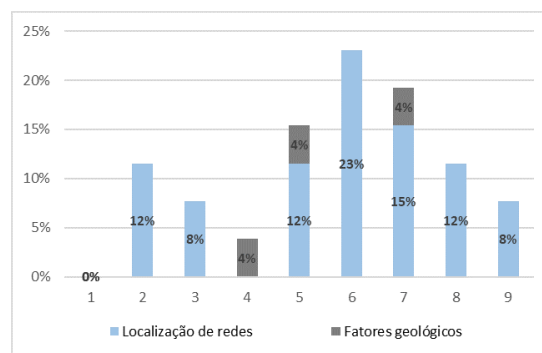


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.12: Comparação dos fatores: fatores de projeto e fatores geológicos



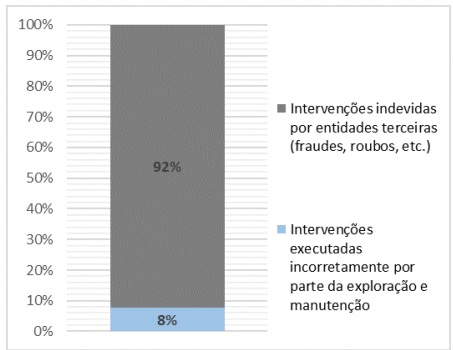
(a) Seleção do fator de risco mais importante



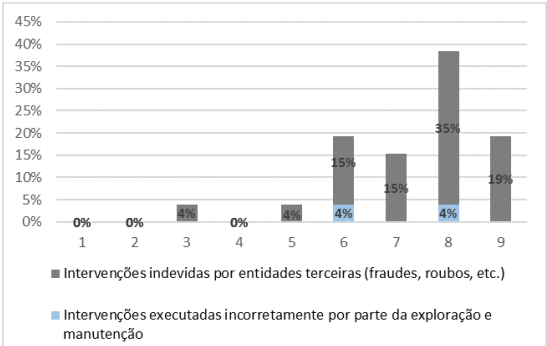
(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.13: Comparação dos fatores: localização de redes e fatores geológicos

Comparação dos subcritérios associados às intervenções indevidas por entidades terceiras ou executadas incorretamente (inclui internos e PSE)

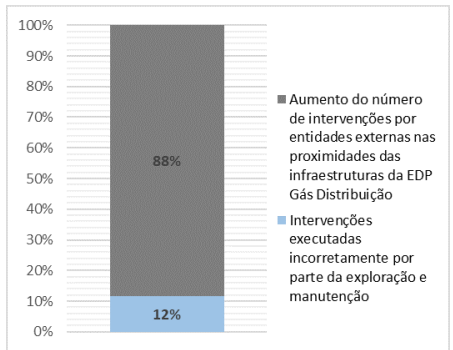


(a) Seleção do fator de risco mais importante

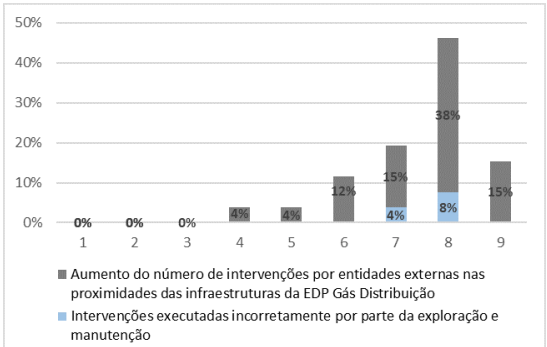


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.14: Comparação dos subcritérios: operações executadas incorretamente por parte da exploração e manutenção e intervenções indevidas por entidades terceiras (fraudes, roubos, entre outras)

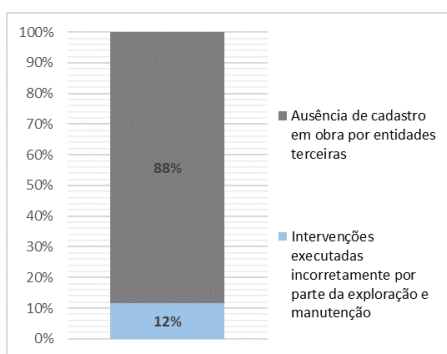


(a) Seleção do fator de risco mais importante

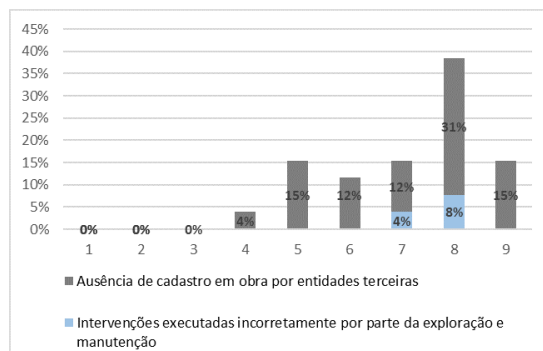


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.15: Comparação dos subcritérios: operações executadas incorretamente por parte da exploração e manutenção e aumento do número de intervenções por parte de entidades externas nas proximidades da EDP Gás Distribuição

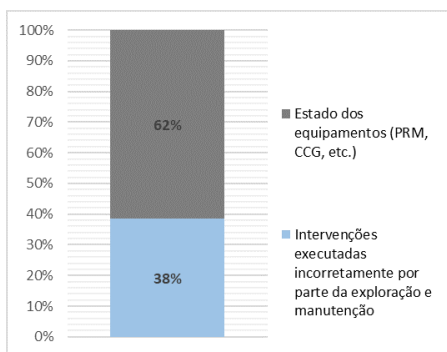


(a) Seleção do fator de risco mais importante

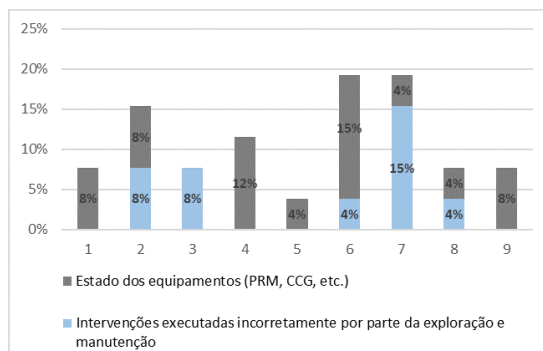


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.16: Comparação dos subcritérios: operações executadas incorretamente por parte da exploração e manutenção e ausência de cadastro em obras por entidades terceiras

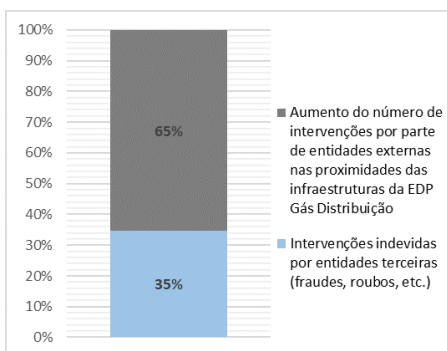


(a) Seleção do fator de risco mais importante

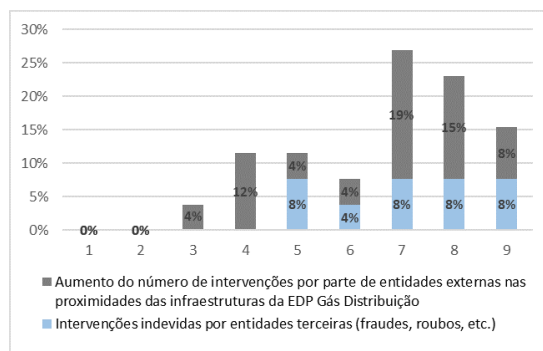


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.17: Comparação dos subcritérios: operações executadas incorretamente por parte da exploração e manutenção e estado dos equipamentos (PRM, CCG, entre outros)

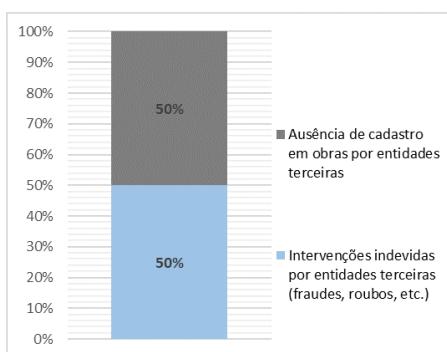


(a) Seleção do fator de risco mais importante

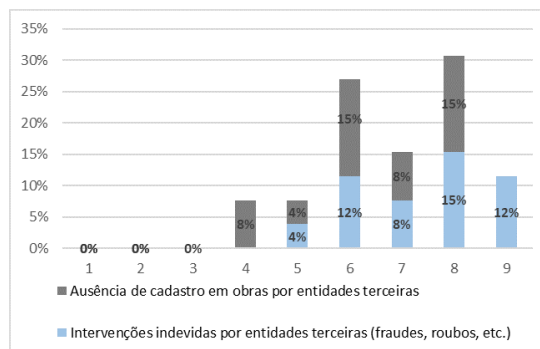


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.18: Comparação dos subcritérios: intervenções indevidas por entidades terceiras (fraudes, roubos, entre outras) e aumento do número de intervenções por parte de entidades externas nas proximidades da EDP Gás Distribuição

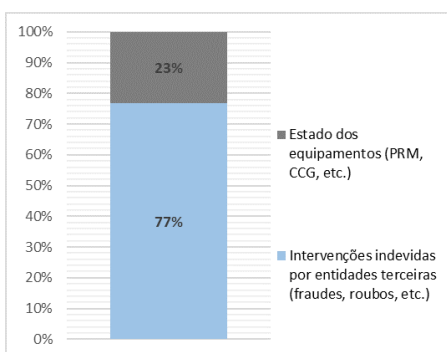


(a) Seleção do fator de risco mais importante

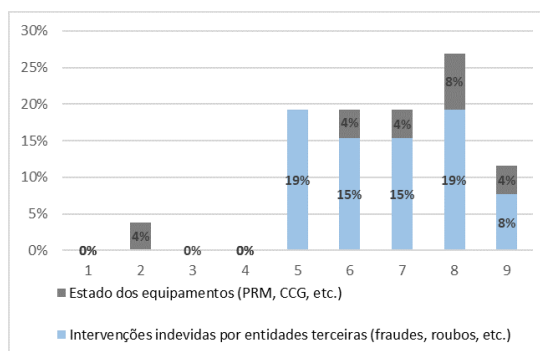


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.19: Comparação dos subcritérios: intervenções indevidas por entidades terceiras (fraudes, roubos, entre outras) e ausência de cadastro em obras por entidades terceiras

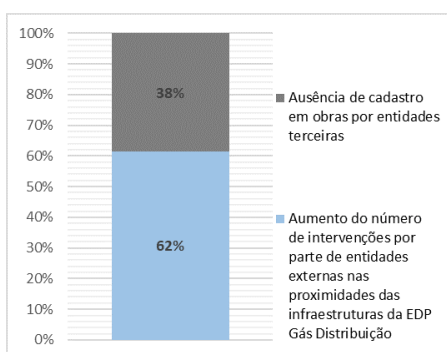


(a) Seleção do fator de risco mais importante

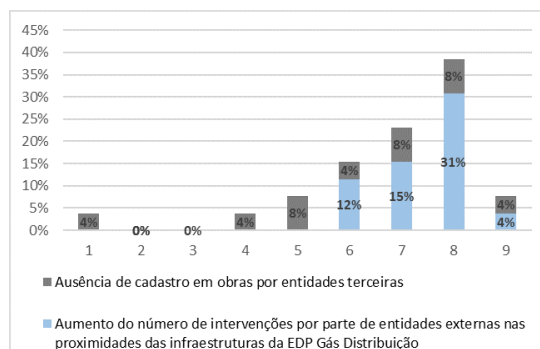


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.20: Comparação dos subcritérios: intervenções indevidas por entidades terceiras (fraudes, roubos, entre outras) e estados equipamentos (PRM, CCG, entre outros)

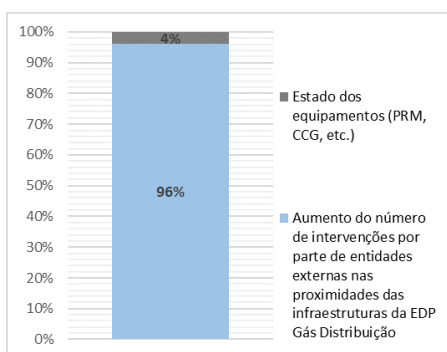


(a) Seleção do fator de risco mais importante

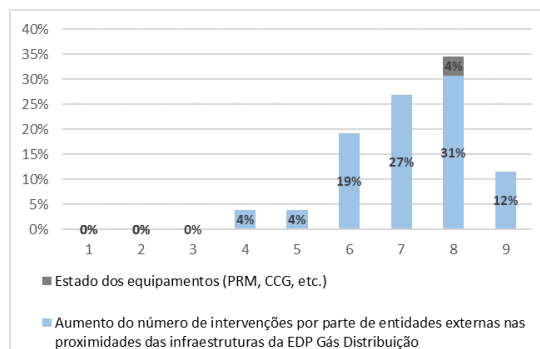


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.21: Comparação dos subcritérios: aumento do número de intervenções por parte de entidades externas nas proximidades da EDP Gás Distribuição e ausência de cadastro em obras por entidades terceiras

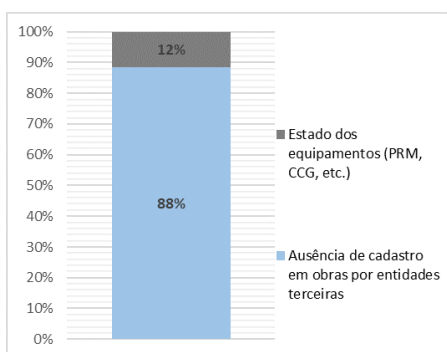


(a) Seleção do fator de risco mais importante

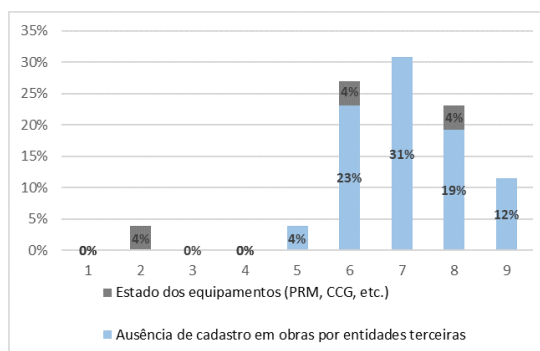


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.22: Comparação dos subcritérios: aumento do número de intervenções por parte de entidades externas nas proximidades da EDP Gás Distribuição e estado dos equipamentos (PRM, CCG, entre outros)



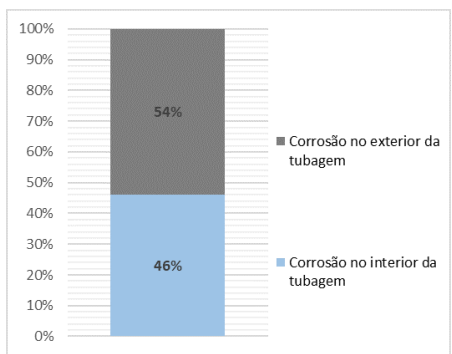
(a) Seleção do fator de risco mais importante



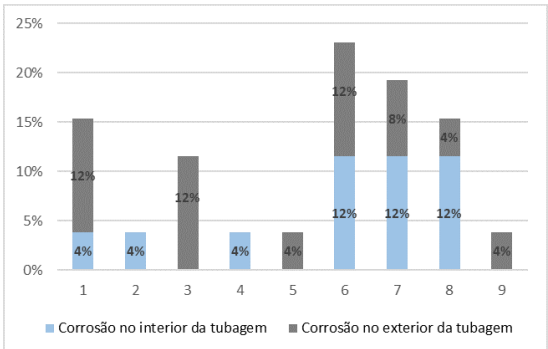
(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.23: Comparação dos subcritérios: ausência de cadastro em obras por entidades terceiras e estado dos equipamentos (PRM, CCG, entre outros)

Comparação dos subcritérios associados à corrosão nas tubagens de aço



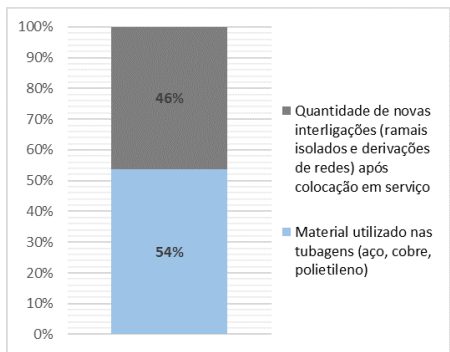
(a) Seleção do fator de risco mais importante



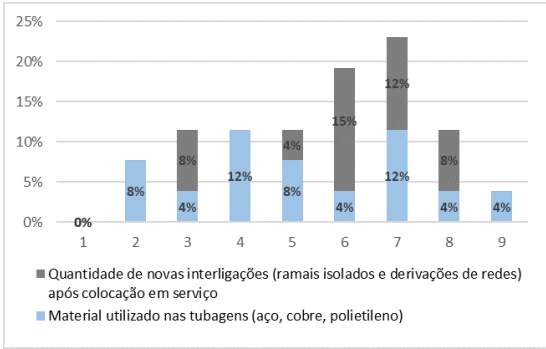
(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.24: Comparação dos subcritérios: corrosão no interior da tubagem e corrosão no exterior da tubagem

Comparação dos subcritérios associados aos fatores de projeto

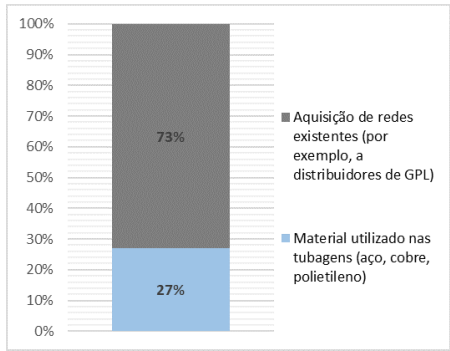


(a) Seleção do fator de risco mais importante

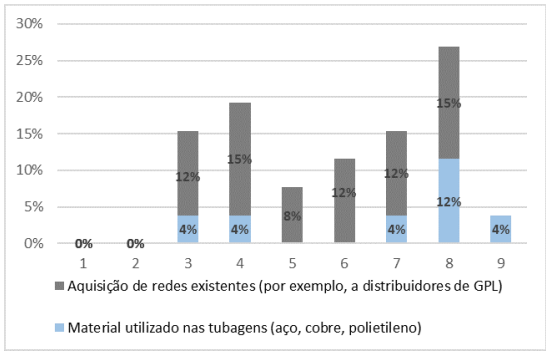


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.25: Comparação dos subcritérios: material utilizado nas tubagens (aço, cobre e polietileno) e quantidade de novas interligações (ramais isolados e derivações de redes) após colocação em serviço

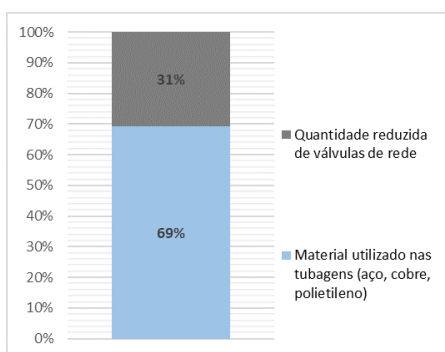


(a) Seleção do fator de risco mais importante

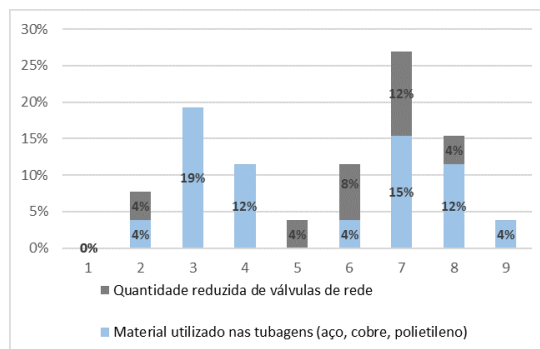


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.26: Comparação dos subcritérios: material utilizado nas tubagens (aço, cobre e polietileno) e aquisição de redes existentes a terceiros (por exemplo, distribuidores de GPL)

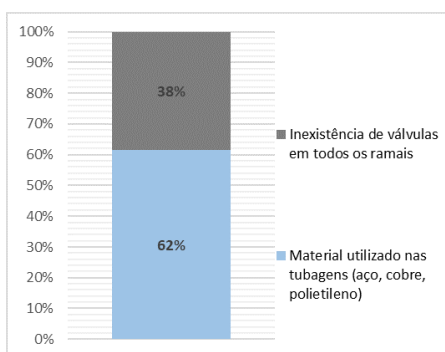


(a) Seleção do fator de risco mais importante

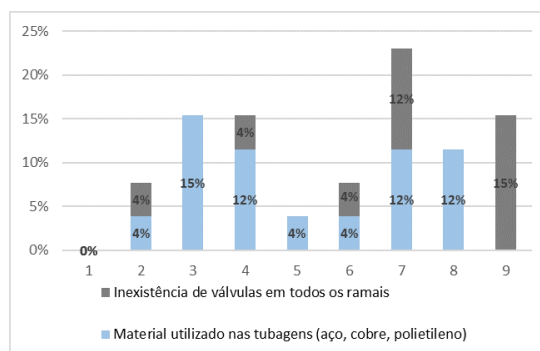


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.27: Comparação dos subcritérios: material utilizado nas tubagens (aço, cobre e polietileno) e quantidade de válvulas de rede

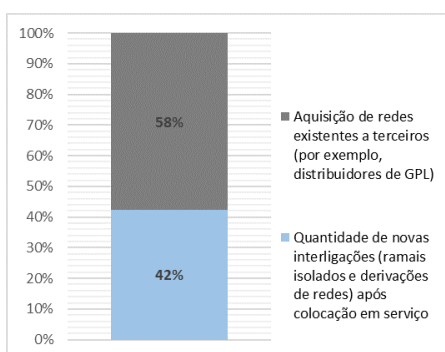


(a) Seleção do fator de risco mais importante

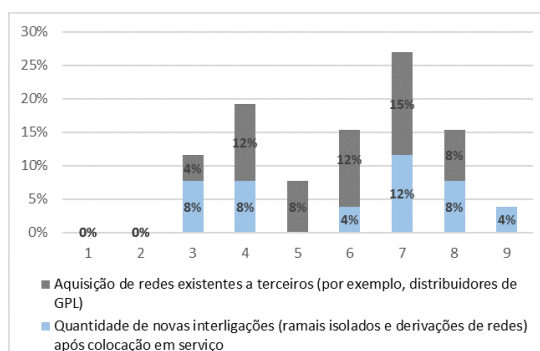


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.28: Comparação dos subcritérios: material utilizado nas tubagens (aço, cobre e polietileno) e existência de válvulas em todos os ramais

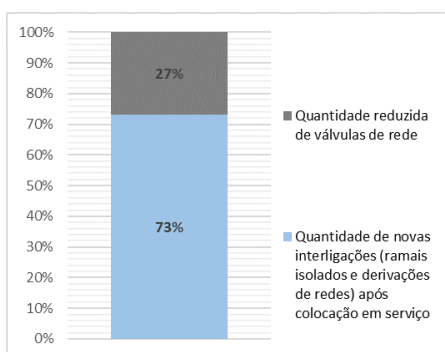


(a) Seleção do fator de risco mais importante

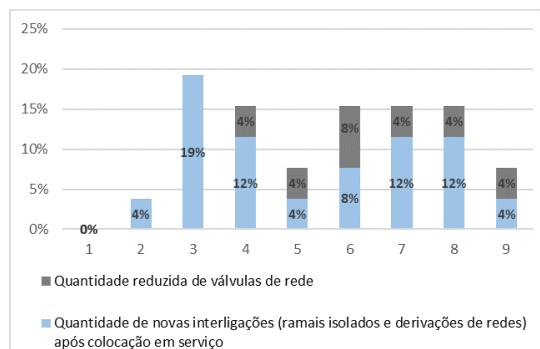


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.29: Comparação dos subcritérios: quantidade de novas interligações (ramais isolados e derivações de redes) após colocação em serviço e aquisição de redes existentes a terceiros (por exemplo, distribuidores de GPL)

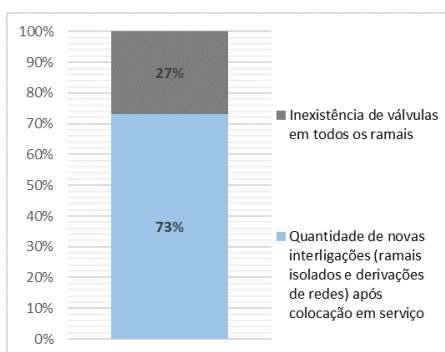


(a) Seleção do fator de risco mais importante

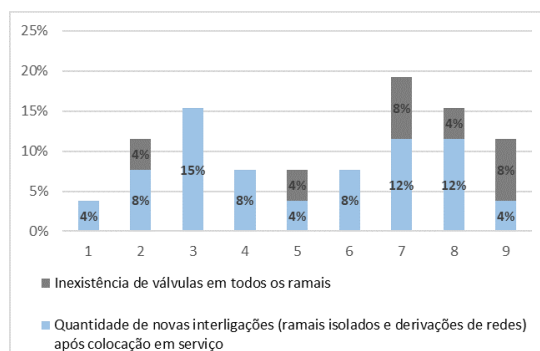


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.30: Comparação dos subcritérios: quantidade de novas interligações (ramais isolados e derivações de redes) após colocação em serviço e quantidade de válvulas de rede

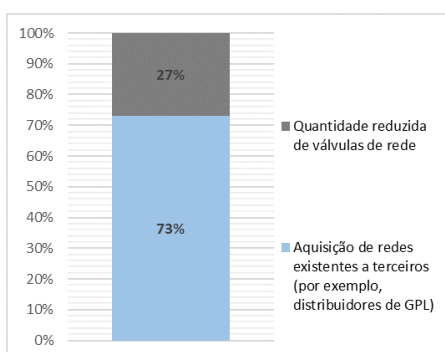


(a) Seleção do fator de risco mais importante

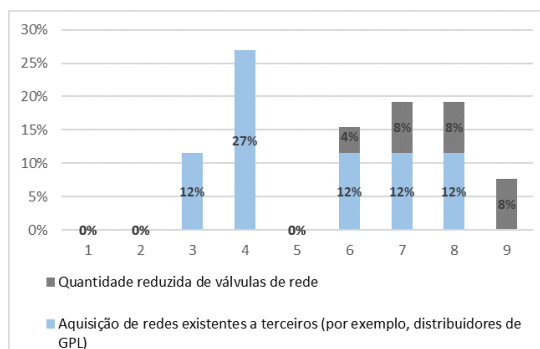


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.31: Comparação dos subcritérios: quantidade de novas interligações (ramais isolados e derivações de redes) após colocação em serviço e existência de válvulas em todos os ramais

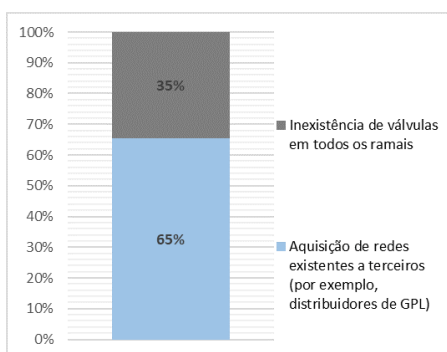


(a) Seleção do fator de risco mais importante

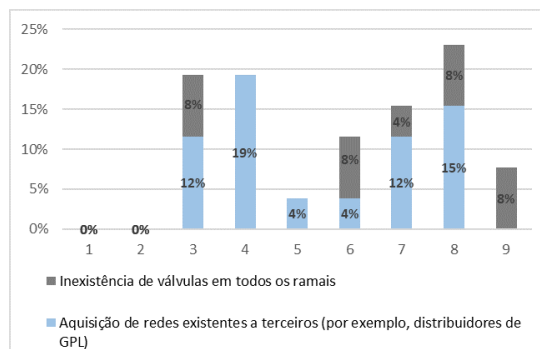


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.32: Comparação dos subcritérios: aquisição de redes existentes a terceiros (por exemplo, distribuidores de GPL) e quantidade de válvulas de rede

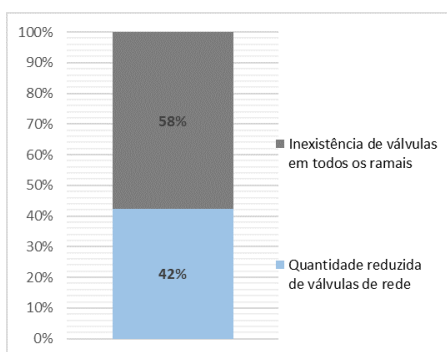


(a) Seleção do fator de risco mais importante

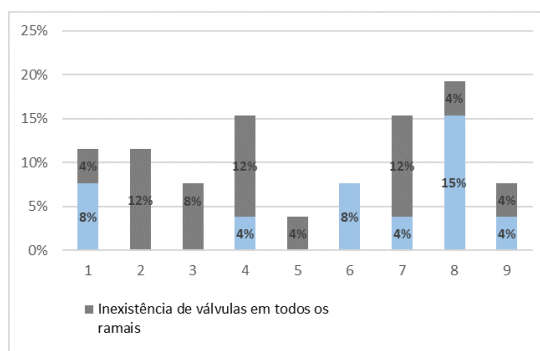


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.33: Comparação dos subcritérios: aquisição de redes existentes a terceiros (por exemplo, distribuidores de GPL) e existência de válvulas em todos os ramais



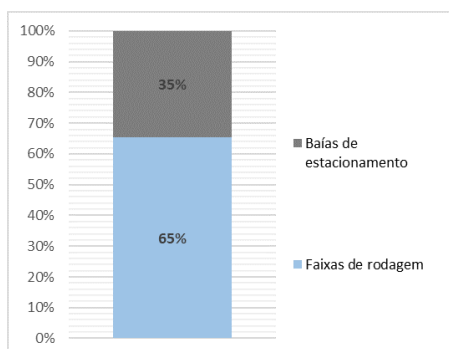
(a) Seleção do fator de risco mais importante



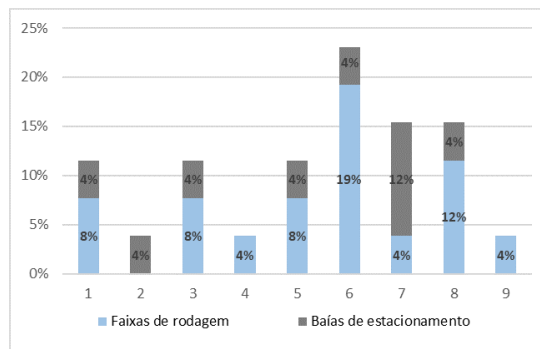
(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.34: Comparação dos subcritérios: quantidade de válvulas de rede e existência de válvulas em todos os ramais

Comparação dos subcritérios associados à localização de redes

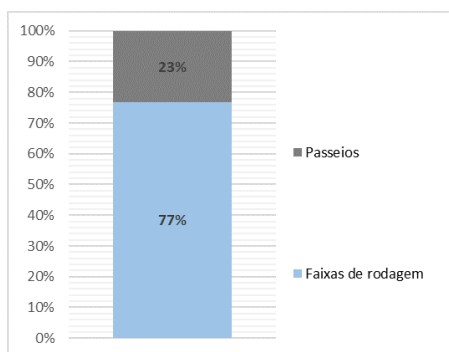


(a) Seleção do fator de risco mais importante

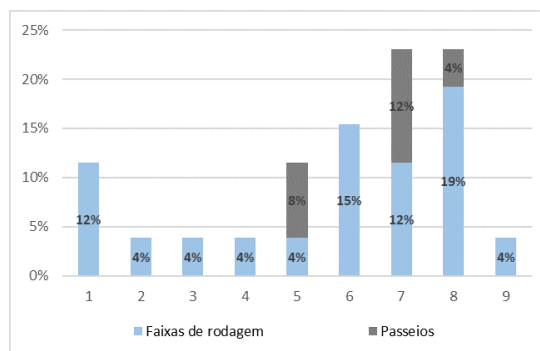


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.35: Comparação dos subcritérios: faixas de rodagem e baías de estacionamento

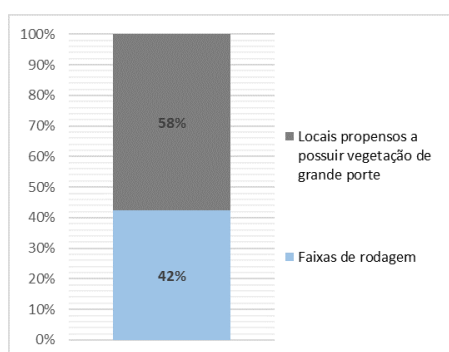


(a) Seleção do fator de risco mais importante

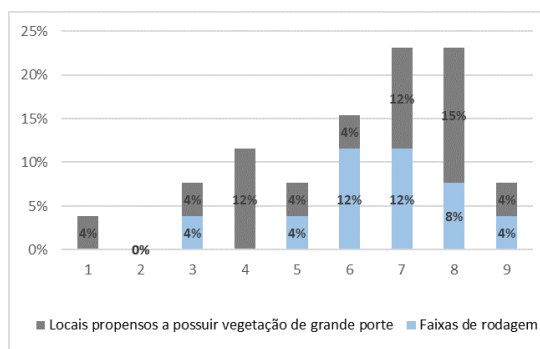


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.36: Comparação dos subcritérios: faixas de rodagem e passeios

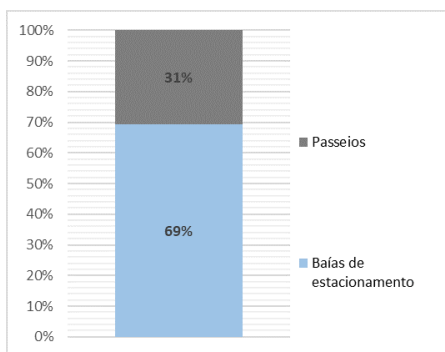


(a) Seleção do fator de risco mais importante

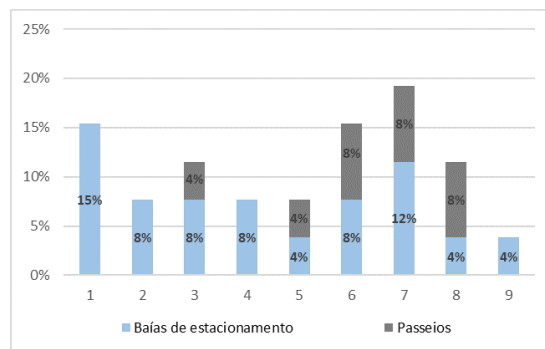


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.37: Comparação dos subcritérios: faixas de rodagem e locais propensos a possuir vegetação de grande porte

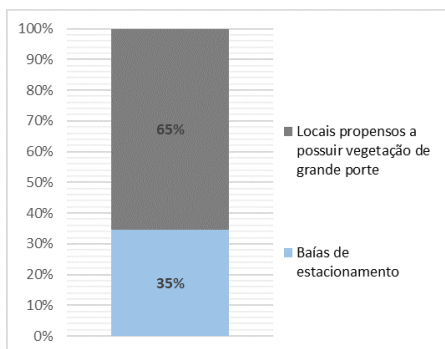


(a) Seleção do fator de risco mais importante

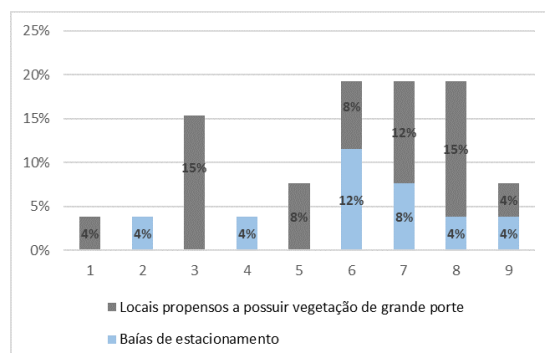


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.38: Comparação dos subcritérios: baías de estacionamento e passeios

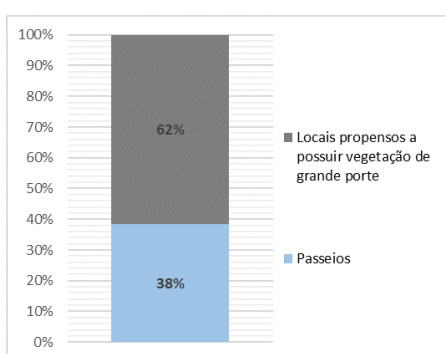


(a) Seleção do fator de risco mais importante

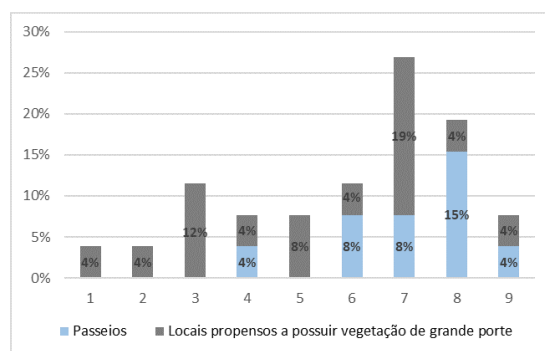


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.39: Comparação dos subcritérios: baías de estacionamento e locais propensos a possuir vegetação de grande porte



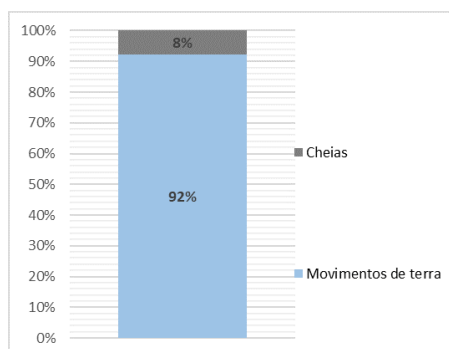
(a) Seleção do fator de risco mais importante



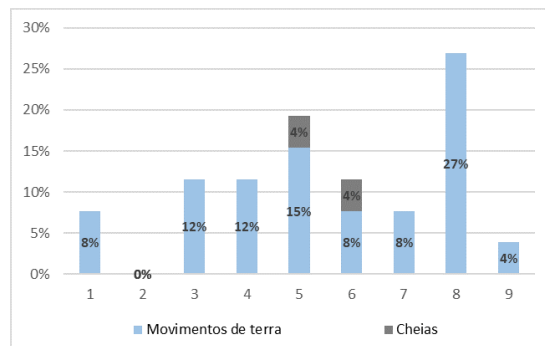
(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.40: Comparação dos subcritérios: passeios e locais propensos a possuir vegetação de grande porte

Comparação dos subcritérios associados aos fatores geológicos

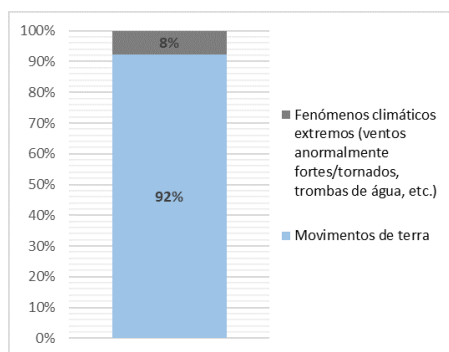


(a) Seleção do fator de risco mais importante

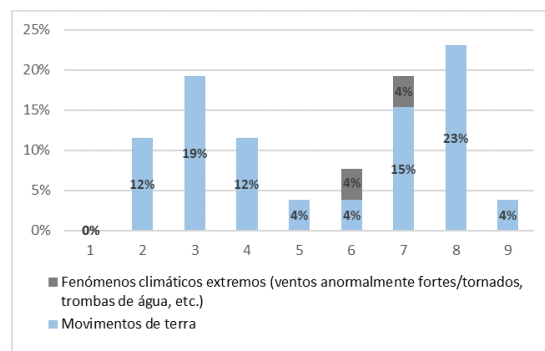


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.41: Comparação dos subcritérios: movimentos de terra e cheias

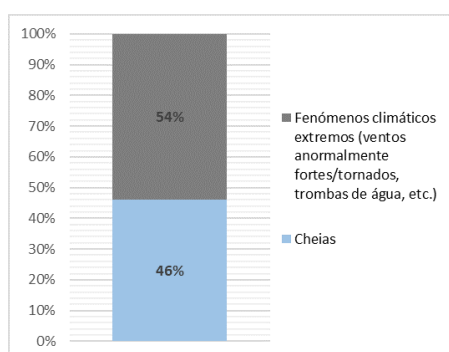


(a) Seleção do fator de risco mais importante

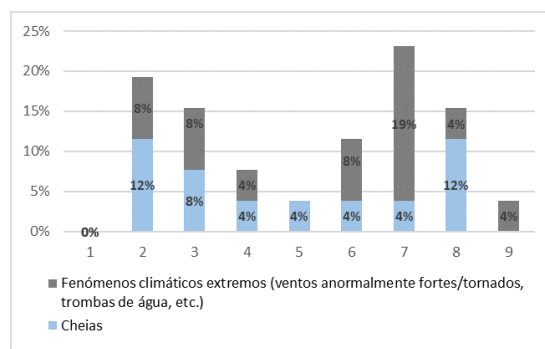


(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.42: Comparação dos subcritérios: movimentos de terra e fenômenos climáticos extremos



(a) Seleção do fator de risco mais importante



(b) Valores atribuídos de forma a caracterizar a relação de importância entre os dois fatores

Figura A.43: Comparação dos subcritérios: cheias e fenômenos climáticos extremos